

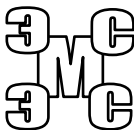
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
технический университет»

С.А. Белозоров, А.В. Тикунов, Т.Е. Черных

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ
И КОНСТРУИРОВАНИИ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН:
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Утверждено учебно-методическим советом
университета в качестве учебного пособия



Воронеж 2017

УДК 621.313:004.9

ББК 31.261

Белозоров С.А. Использование информационных технологий при проектировании и конструировании электрических машин: лабораторный практикум: учеб. пособие [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые и граф. данные (3,3 Мб) / С.А. Белозоров, А.В. Тикунов, Т.Е. Черных. – Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2017. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM) : цв. – Систем. требования : ПК 500 и выше; 256 Мб ОЗУ; Windows XP; SVGA с разрешением 1024x768; Adobe Acrobat; CD-ROM дисковод; мышь. – Загл. с экрана.

В учебном пособии рассматриваются способы использования программных продуктов на различных этапах процессов проектирования и конструирования электрических машин и их узлов.

Издание соответствует требованиям Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» (профиль «Электромеханика»), дисциплине «Использование информационных технологий при проектировании и конструировании электрических машин».

Ил. 100. Табл. 13. Библиогр.: 10 назв.

Рецензенты: кафедра электроэнергетики

Международного института компьютерных технологий (зав. кафедрой д-р техн. наук, проф. А.Н. Анненков);
канд. техн. наук, доц. А.В. Романов

© Белозоров С.А., Тикунов А.В.,
Черных Т.Е., 2017

© ФГБОУ ВО «Воронежский
государственный технический
университет», 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
Лабораторная работа № 1. Использование информационных технологий для предварительного сбора информации	5
Лабораторная работа № 2. Использование математических САПР для предварительных расчётов геометрии электрических машин	12
Лабораторная работа № 3. Использование САПР для подготовки чертежей деталей	31
Лабораторная работа № 4. Использование САПР для построения схем обмоток	48
Лабораторная работа № 5. Использование информационных технологий для построения характеристик	61
Лабораторная работа № 6. Прочностные расчёты деталей электрических машин	76
Лабораторная работа № 7. Электромагнитные расчёты при проектировании электромеханических устройств	95
Лабораторная работа № 8. Тепловые расчёты электромеханических устройств	107
Библиографический список	112

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время использование компьютерной техники охватывает все виды профессиональной деятельности. Такая популярность информационных технологий связана с повышением эффективности работы этих объектов. Использование информационных технологий при проектировании и конструировании электрических машин позволяет достичь нескольких целей. Так при проектировании новых электромеханических устройств снижается время процесса, повышается качество результата за счёт оперативного доступа к стандартам, автоматизации процесса проектирования.

При таком подходе к проектированию повышаются требования к знаниям и умениям современных специалистов электротехнического профиля. Современный специалист, работающий в области проектирования и конструирования электрических машин или их отдельных частей, должен уметь получать, обрабатывать и использовать информацию с помощью компьютеров и коммуникационных средств связи. Дисциплина "Использование информационных технологий при проектировании и конструировании электрических машин" призвана заложить фундамент по использованию информационных технологий будущим специалистам в области электромеханики.

Цели и задачи изучения дисциплины – получение теоретических основ и практических аспектов в области информационных технологий, используемых при проектировании и конструировании электрических машин.

Лабораторный практикум основан на использовании **специального проблемно- и объектно-ориентированного программного обеспечения**, функциональные возможности которых рассмотрены в пособии.

Лабораторная работа №1

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО СБОРА ИНФОРМАЦИИ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Получение практических навыков работы с электронными источниками информации, справочной литературой.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЯСНЕНИЯ

Поиск информации – важный этап в процессе проектирования новых электромеханических изделий. На этом этапе производится ознакомление с текущими технологиями и методиками по объекту проектирования. Кроме того, этот процесс даёт понимание о существующих и перспективных конструкциях проектируемого изделия и его деталей.

В настоящее время доступными источниками информации являются печатные и электронные источники информации. В свою очередь печатные делятся на первичные и вторичные. К первичным относятся: книги, брошюры, периодические издания, диссертации, рукописи, патенты и т.д.; ко вторичным относятся: аннотации, рефераты, каталоги, резюме. Электронные, помимо оцифрованных версий печатных источников, включают в себя банки, базы данных и информационно-поисковые системы.

Ниже представлены ссылки на некоторые информационные ресурсы:

www1.fips.ru – база патентных материалов,
docs.cntd.ru/gost – база действующих и отменённых государственных стандартов,

elibrary.ru – научная электронная библиотека, содержит рефераты и полные тексты статей, научных публикаций, научно-технических журналов.

3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Используя доступ к ресурсам Internet, найдите тексты следующих государственных стандартов:

- стандартные высоты осей вращения электрических машин;
- установочно-присоединительные размеры электрических машин;
- номинальные данные электрических машин;
- исполнения по степени монтажа электрических машин;
- исполнения по степени защиты электрических машин.

В отчёте привести полное название стандарта и краткое описание его содержания.

Используя доступ к ресурсам Internet, найдите 3 патента по перспективным конструкциям асинхронного электродвигателя.

В отчёте привести краткое описание содержаний патентов.

Используя доступ к ресурсам Internet, найдите 3 статьи по научно-техническим разработкам в области асинхронных двигателей.

В отчёте привести краткое описание содержаний статей.

Сделать выборку номинальных данных, характеристик, размеров асинхронного двигателя. Работа производится по вариантам, распределяемым преподавателем. В качестве источника информации предлагается справочник [1].

Данные по двигателю оформить в читаемой форме. Пример формы для заполнения приведён в *форме для заполнения*, допускается оформлять в произвольной форме.

В справочнике [1] приведено несколько формул для расчёта основных величин: номинального тока, номинального момента, активного и индуктивного сопротивлений. Их необходимо предварительно рассчитать для внесения их в форму с данными.

В отчёте привести заполненную справочными данными форму.

Таблица 1.1

Варианты заданий для работы

1 подгруппа		2 подгруппа	
№	Двигатель	№	Двигатель
1	4AA50A4Y3	9	4A160S2Y3
2	4AA56A4Y3	10	4A160S4Y3
3	4AA63A6Y3	11	4A180M8Y3
4	4A71B2Y3	12	4A200M4Y3
5	4A71B8Y3	13	4A200M6Y3
6	4A80A4Y3	14	4A250S2Y3
7	4A132S6Y3	15	4A250S4Y3
8	4A132S8Y3	16	4A250S10Y3

Используя поисковую систему, найти два современных аналога рассмотренного двигателя: отечественный и импортный.

В отчёте привести номинальные параметры и габаритные размеры найденных аналогов.

ФОРМА ДЛЯ ЗАПОЛНЕНИЯ ДАННЫХ ПО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЮ

Двигатель: _____

Справочные данные двигателя:

Номинальная мощность:	$P_{2ном}$	=	_____ кВт.
Синхронная частота вращения:	n_c	=	_____ об/мин
Номинальный ток:	$I_{ном}$	=	_____ А.
Номинальное напряжение:	$U_{ном}$	=	____/____ В.
КПД:	η	=	_____ %.
Коэффициент мощности	$\cos\varphi$	=	_____.
Число пар полюсов:	$2p$	=	_____.

Параметры механической характеристики

Номинальное скольжение:	$s_{НОМ}$	=	_____	о.е.
Критическое скольжение:	s_K	=	_____	о.е.
Номинальный момент:	$M_{НОМ}$	=	_____	Н·м.
Пусковой момент:	m_n	=	_____	о.е.
Минимальный момент:	m_M	=	_____	о.е.
Критический момент:	m_K	=	_____	о.е.
Пусковой ток	i_n	=	_____	о.е.

Габаритные размеры двигателя

Габаритные установочно-присоединительные размеры двигателя представлены в табл. 1.2 в соответствии с рис. 1.1:

Таблица 1.2

Габаритные установочно-присоединительные размеры

Размер	Величина, мм	Размер	Величина, мм	Размер	Величина, мм
l_1		l_{12}		h_1	
l_{10}		b_1		h_5	
l_{11}		b_{10}		h_{10}	
l_{30}		b_{11}		h_{31}	
l_{31}		b_{12}		h_{34}	
l_{34}		b_{31}		d_1	
l_{51}		b_{34}		d_{10}	
l_{36}		h		d_{30}	

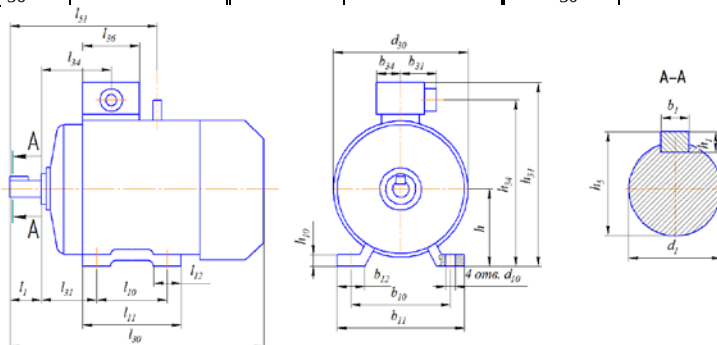


Рис. 1.1. Габаритные, установочно-присоединительные размеры

Параметры вала для механического расчёта

Размеры вала для прочностного расчёта сведены в табл. 1.3 в соответствии с рис. 1.2:

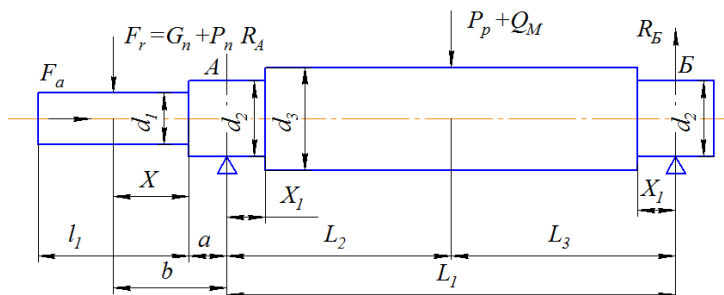


Рис. 1.2. Эскиз вала

Таблица 1.3

Размеры вала для механического расчёта

Размер	Величина, мм	Размер	Величина, мм
l_1		d_1	
a		d_2	
L_1		d_3	
L_2			

Вес ротора с валом

$P_p = \underline{\hspace{2cm}}$ Н.

Размеры деталей двигателя

Внешний диаметр сердечника статора: $D_{a1} = \underline{\hspace{2cm}}$ мм.

Внутренний диаметр сердечника статора $D_{l1} = \underline{\hspace{2cm}}$ мм.

Длина воздушного зазора $l_\delta = \underline{\hspace{2cm}}$ мм.

Ширина воздушного зазора $\delta = \underline{\hspace{2cm}}$ мм.

Число пазов статора $Z_1 = \underline{\hspace{2cm}}$.

Число пазов ротора $Z_2 = \underline{\hspace{2cm}}$.

Форма паза статора: $\underline{\hspace{2cm}}$.

Размеры паза: $b_1 = \underline{\hspace{2cm}}$ мм. $b_2 = \underline{\hspace{2cm}}$ мм.

$h = \underline{\hspace{2cm}}$ мм. $e = \underline{\hspace{2cm}}$ мм. $m = \underline{\hspace{2cm}}$ мм.

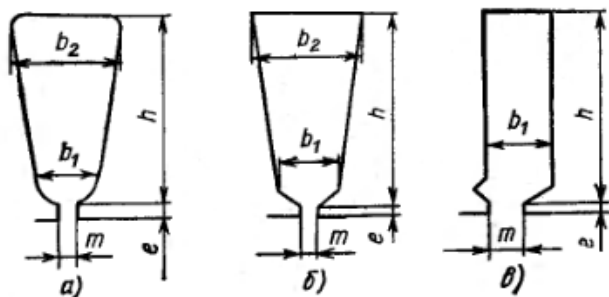


Рис. 1.3. Форма и размеры пазов статора

Форма паза ротора: _____.

Размеры паза: $b_1 =$ _____ мм. $b_2 =$ _____

мм.

$h =$ _____ мм. $e =$ _____ мм. $m =$ _____

мм.

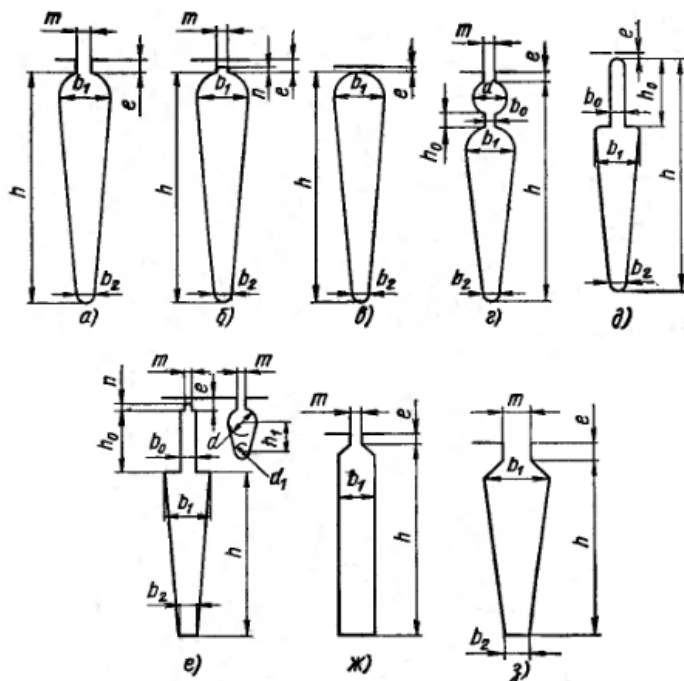


Рис. 1.4. Форма и размеры пазов ротора

Обмоточные данные двигателя

Тип обмотки статора: _____
Шаг обмотки: $y =$ _____ .
Число эффективных проводников в пазу $S_n =$ _____ .
Число элементарных проводников в
одном эффективном $p =$ _____ .
Число параллельных ветвей обмотки фазы $a =$ _____ .
Номинальный диаметр проволоки обмотки: $d =$ _____
мм.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ДЛЯ ДОМАШНЕЙ ПОДГОТОВКИ

1. Что такое номинальные данные электрической машины?
2. Какие размеры относятся к установочно-присоединительным?
3. Что такое исполнение двигателя по степени монтажа, степени защиты, климатическое исполнение?
4. Что такое патент и для чего он нужен?
5. Какие типы исполнений по степени защиты выполняют в двигателях серии 4А?

Лабораторная работа № 2

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ САПР ДЛЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫХ РАСЧЁТОВ ГЕОМЕТРИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Знакомство с аналитическими методиками проектирования асинхронного электродвигателя. Получение практических навыков работы в программах для математических расчётов. Закрепление навыков работы со справочной литературой.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЯСНЕНИЯ

Современные методики проектирования новых электро-механических изделий используют моделирование разрабатываемого изделия численными методами с последующей коррекцией геометрических размеров. При таком подходе необходимо иметь первоначальную геометрию изделия. В случае, если есть аналогичное изделие, с него снимаются все геометрические размеры, по которым строят модель.

При создании изделия с нуля, т.е. оригинальных конструкций у которых нет аналогов, либо данные о конструкции этих аналогов получить невозможно, применяются аналитические расчёты геометрии.

В одних случаях такие методики есть, в других возникает необходимость эти методики создавать.

При использовании аналитических методик проектирования изделий возникает ряд трудностей:

- большое количество формул для нахождения величин;
- необходимость корректировать промежуточные коэффициенты (как следствие пересчёты далее следующих формул);
- необходимость коррекции формул с последующим пересчётом.

Эти трудности увеличивают время расчёта геометрии стартовой модели. Кроме этого, ручной пересчёт приводит к случайным ошибкам в расчётах и набеганию погрешностей.

Для упрощения данной стадии проектирования могут быть использованы математические САПР (системы компьютерной алгебры). Они представляют собой мощный калькулятор с возможностью записи хода решения в математической форме. Таким образом, можно всю методику проектирования в виде формул записать в документ математической САПР и, корректируя данные и формулы, добиться требуемого результата.

К математическим САПР относятся следующие программы: MathCad, MatLab, Maxima, SMath Studio, SciLab, Mathematica, Maple и другие.

Для решения подобных задач подойдут табличные процессоры (например, MS Excel, OO Calc), а также среды программирования. Использование сред программирования требует наличия соответствующих навыков.

Система компьютерной алгебры SMath Studio

SMath Studio является уникальной системой для научных и инженерных расчетов и позволяет работать с формулами, числами, текстом и графиками. С помощью **SMath Studio** можно решить почти любую математическую как численно, так и в символьной форме. **SMath Studio** позволяет записывать на экране компьютера формулы в их привычном виде.

Объединяя в одном рабочем листе текст, графику, и математические выкладки, **SMath Studio** облегчает понимание самых сложных вычислений. На рис. 2.1 представлен интерфейс программы **SMath Studio**.

Рабочее окно **SMath Studio** является стандартным окном **Windows** – приложения. Сверху располагается строка заголовка, где приводится название приложения (**SMath Studio**) и имя рабочего листа (документа). Ниже располагается строка меню, где все команды пакета сгруппированы по функциональному назначению. Ниже строки меню располагается панель инстру-

ментов – **Стандартная**. Панель с математическими операндами, функциями и командами располагаются с правой стороны от рабочей зоны документа. Самая нижняя строка интерфейса – строка состояния, где приводится информация о текущих режимах. Для удобства работы с большими листами имеются линейки вертикальной и горизонтальной прокрутки.

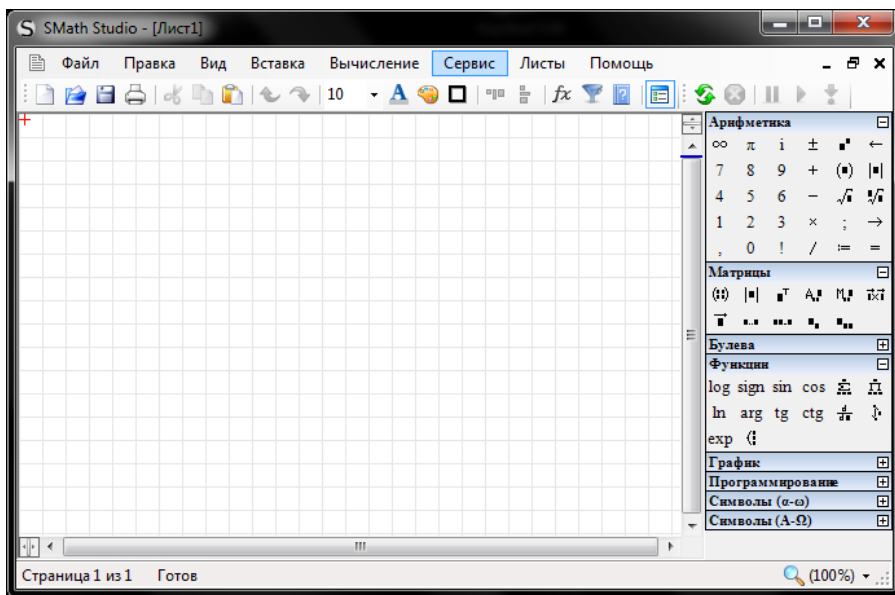


Рис. 2.1. Рабочее окно SMATH Studio

3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Используя методику проектирования асинхронных двигателей из [2], необходимо рассчитать геометрию активных частей асинхронного двигателя. Работа выполняется по вариантам, представленным в таблице 2.1, согласно заданию преподавателя.

Таблица 2.1

Задание по вариантам

1 подгруппа				2 подгруппа			
№	Р ₂ , кВт	п, об/мин	h, мм	№	Р ₂ , кВт	п, об/мин	h, мм
1	0,06	1500	50	9	15	3000	160
2	0,12	1500	56	10	15	1500	160
3	0,18	1000	63	11	15	750	180
4	1,1	3000	71	12	37	1500	200
5	0,25	750	71	13	22	1000	200
6	1,1	1500	80	14	75	3000	250
7	5,5	1000	132	15	75	1500	250
8	4	750	132	16	30	600	250

Для всех вариантов: исполнение по степени защиты IP44, по степени монтажа IM1001, климатическое исполнение IC01, номинальное фазное напряжение 220 В.

Расчёт требуется произвести в системе компьютерной алгебры: SMATH Studio. По согласованию с преподавателем выбор программного продукта может быть изменён.

Ниже приведена методика, которую необходимо реализовать в системе компьютерной алгебры и добиться получения адекватного результата. Результаты, полученные в работе, сравнить с результатами лабораторной работы №1.

Прикидочный расчёт геометрии изделия

Расчёт производится для определения основных размеров активных частей машины: магнитопроводов статора и ротора, а также для получения первичных параметров обмотки двигателя.

Методика расчёта, представленная ниже – это методика, изложенная в [2] с рядом упрощений и допущений.

Выбор главных размеров

Число пар полюсов:

$$p = \frac{60 \cdot f}{n}, \quad (2.1)$$

где f – частота перемагничивания, $f = 50$ Гц.

Выбираем наружный диаметр статора D_a :

h, мм	50	56	63	71	80	132	160	180	200	250
D_a , мм	81	89	100	116	131	225	272	313	349	437

Внутренний диаметр статора

$$D = k_D \cdot D_a, \quad (2.2)$$

где k_D – коэффициент, характеризующий отношение внутреннего и наружного диаметров сердечника статора асинхронного двигателя.

$2p$	2	4	6	8-10
K_D	0,52-0,57	0,64-0,68	0,70-0,72	0,74-0,77

Полюсное деление

$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{2p}. \quad (2.3)$$

Расчётная мощность

$$P' = P_2 \cdot \frac{k_E}{\eta \cdot \cos \varphi}, \quad (2.4)$$

где k_E – коэффициент, характеризующий отношение ЭДС обмотки статора к номинальному напряжению по рис. 2.2.,
 η – коэффициент полезного действия, по рис. 2.3,

$\cos\varphi$ – коэффициент мощности, по рис. 2.3.

Предварительно принимаем линейную нагрузку A и индукцию в воздушном зазоре B_δ по рис. 2.4.

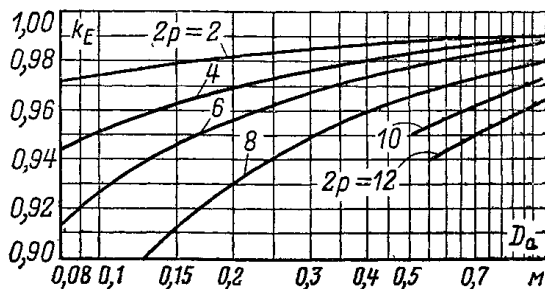


Рис. 2.2. Значения коэффициента k_E

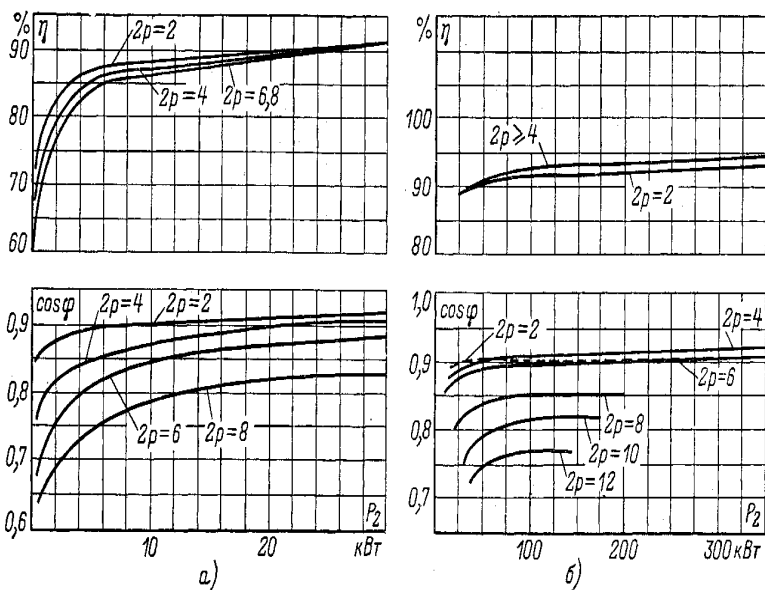


Рис. 2.3. Примерные значения КПД и $\cos \varphi$
 а – со степенью защиты IP44 и мощностью до 30 кВт;
 б – со степенью защиты IP44 и мощностью до 400 кВт

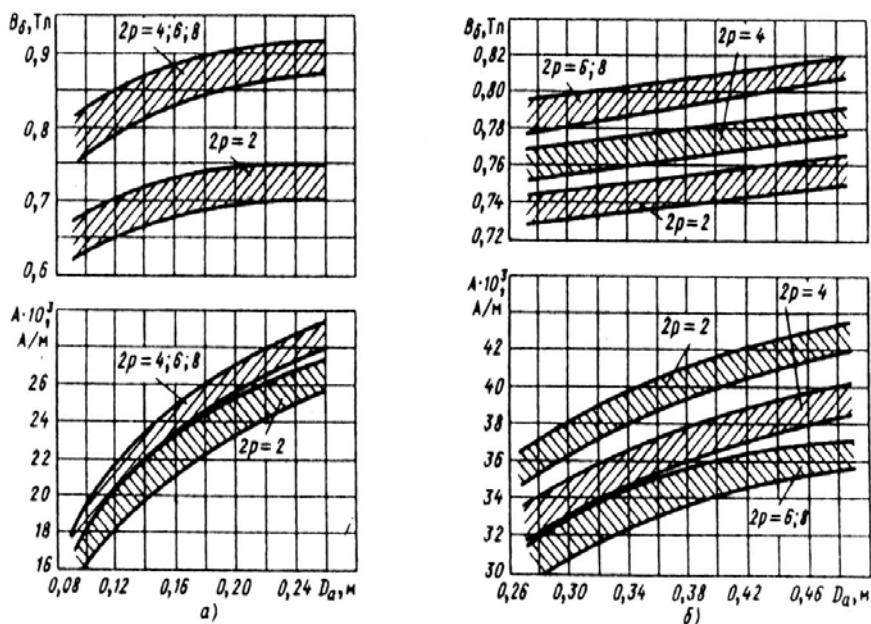


Рис. 2.4. Электромагнитные нагрузки асинхронных двигателей со степенью защиты IP44 при высоте оси вращения:
 а) $h \geq 132 \text{ мм}$; б) $h = 150 \dots 250 \text{ мм}$

Предварительно принимаем обмоточный коэффициент для однослойной обмотки $k_{об} = 0,95-0,96$.

Расчётная длина воздушного зазора

$$l_{\delta} = \frac{P'}{k_B \cdot D^2 \cdot \Omega \cdot k_{об} \cdot A \cdot B_{\delta}}, \quad (2.5)$$

где $k_B = 1,11$ – коэффициент формы поля,

Ω – синхронная угловая скорость ротора,

$$\Omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_1}{60}. \quad (2.6)$$

Для проверки правильности выбора главных размеров определим отношение

$$\lambda = \frac{l_{\delta}}{\tau}. \quad (2.7)$$

Полученное значение λ находится в допустимых пределах для данной высоты оси вращения (рис. 2.5).

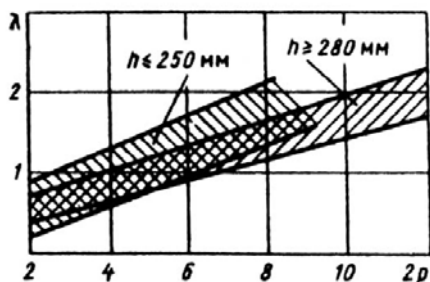


Рис. 2.5. Отношение λ у двигателей серии 4А.

Определение числа пазов статора, числа витков и сечения провода обмотки статора

Предельные значения зубцового деления статора t_{1min} и t_{1max} по рис. 2.6.

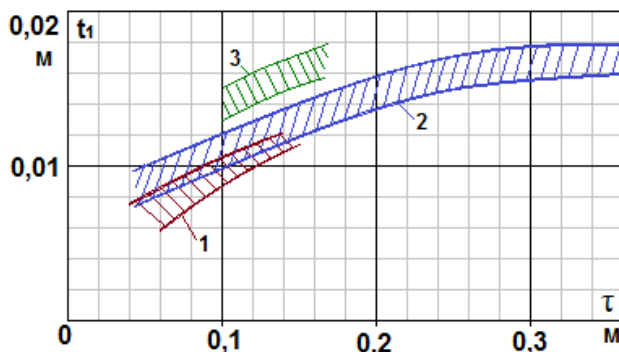


Рис.2.6. Зубцовое деление статора двигателей серии 4А

1 – $h < 90$ мм; 2 – $90 < h < 250$ мм; 3 – $h < 280$ мм

Число пазов статора

$$Z_{1min} = \frac{\pi \cdot D}{t_{1max}}, \quad (2.8)$$

$$Z_{1\max} = \frac{\pi \cdot D}{t_{1\min}}. \quad (2.9)$$

Число пазов статора должно быть кратным числу фаз и число катушечных групп q должно быть целым числом. Исходя из формулы (2.3), принимаем Z_1 , которое должно быть кратным $2p$.

Число катушечных групп

$$q = \frac{Z_1}{2p \cdot m}. \quad (2.10)$$

Уточняем зубцовое деление статора

$$t_1 = \frac{\pi \cdot D}{Z_1}. \quad (2.11)$$

Номинальный ток обмотки статора

$$I_{1H} = \frac{P_2}{m \cdot U_H \cdot \eta \cdot \cos \varphi}. \quad (2.12)$$

Принимаем предварительно число пар параллельных ветвей обмотки $a = 1$. Тогда предварительное число эффективных проводников в пазу

$$u'_n = \frac{\pi \cdot D \cdot A}{I_{1H} \cdot Z_1}. \quad (2.13)$$

Окончательно принимаем число параллельных ветвей a и, следовательно, уточнённое значение числа эффективных проводников в пазу

$$u_n = a \cdot u'_n. \quad (2.14)$$

Число витков в фазе обмотки статора

$$w_1 = \frac{u_n \cdot Z_1}{2a \cdot m}. \quad (2.15)$$

Уточняем значение линейной нагрузки

$$A = \frac{2 \cdot I_{1H} \cdot w_1 \cdot m}{\pi \cdot D}. \quad (2.16)$$

Значение укорочения шага обмотки. Для однослойных обмоток укорочение не делается $\beta = 1$. В случае двухслойных обмоток укорочение обмотки $\beta = \frac{2}{3} \cdot \frac{q+1}{q}$.

Поток в воздушном зазоре

$$\Phi_{\delta} = \frac{k_E \cdot U_H}{4 \cdot k_B \cdot w_1 \cdot k_{o6} \cdot f}, \quad (2.17)$$

$$\text{где } k_{o6} = \frac{0,5}{q \cdot \sin \frac{30^\circ}{q}} \cdot \sin \left(\frac{\pi}{2} \cdot \beta \right).$$

Уточняем значение индукции в воздушном зазоре

$$B_{\delta} = \frac{p \cdot \Phi_{\delta}}{D \cdot l_{\delta}}. \quad (2.18)$$

Предварительно плотность тока в обмотке статора

$$J_1 = \frac{(A \cdot J_1)}{A}, \quad (2.19)$$

где $A \cdot J_1$ – произведение линейной нагрузки и плотности тока в обмотке статора по рис. 2.7.

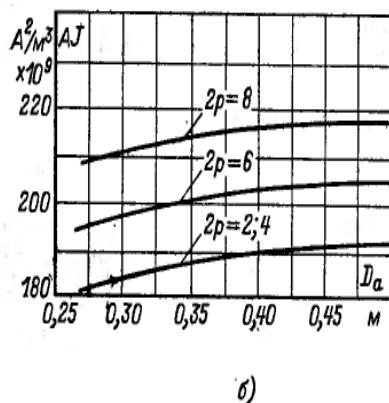
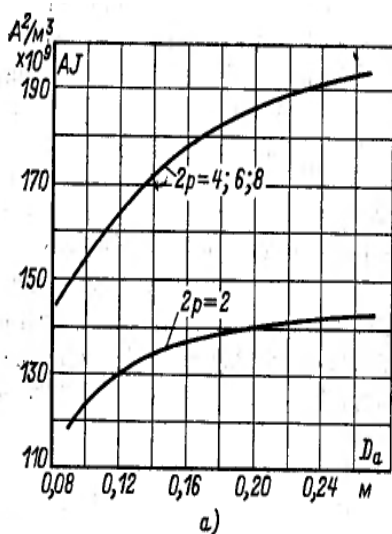


Рис. 2.7. Средние значение произведения (AJ) асинхронных двигателей
а – со степенью защиты IP44, $h \leq 132$ мм, б – при $h=160-250$ мм.

Предварительное сечение эффективного проводника

$$q_{\text{эф}} = \frac{I_{1\text{н}}}{a \cdot J_1} \quad (2.20)$$

Разбиваем эффективный проводник на элементарные. Это действие производится в случае, если $q_{\text{эф}} (q_{\text{эл}}) > 1,4 \text{ мм}^2$.
Определяем $n_{\text{эл}}$ и сечение элементарного проводника

$$q_{\text{эл}} = \frac{q_{\text{эф}}}{n_{\text{эл}}} \quad (2.21)$$

Принимаем ближайший стандартный провод (табл. 2.2).

Таблица 2.2

Размеры стандартных проводов марки ПЭТВ

$d_{\text{гол}}, \text{мм}$	$d_{\text{из}}, \text{мм}$	$q_{\text{эл}}, \text{мм}^2$	$d_{\text{гол}}, \text{мм}$	$d_{\text{из}}, \text{мм}$	$q_{\text{эл}}, \text{мм}^2$
0,08	0,10	0,00502	0,425	0,465	0,1419
0,09	0,11	0,00636	0,45	0,49	0,1590
0,10	0,122	0,00785	0,50	0,545	0,1963
0,112	0,134	0,00985	0,56	0,615	0,246
0,125	0,147	0,01227	0,60	0,655	0,283
0,14	0,162	0,01539	0,63	0,69	0,312
0,15	0,18	0,01767	0,71	0,77	0,396
0,16	0,19	0,0201	0,75	0,815	0,442
0,17	0,20	0,0227	0,80	0,865	0,503
0,18	0,21	0,0255	0,85	0,915	0,567
0,20	0,23	0,314	0,90	0,965	0,636
0,224	0,259	0,0394	0,95	1,015	0,709
0,25	0,285	0,0491	1,00	1,08	0,785
0,28	0,315	0,0616	1,06	1,14	0,883
0,315	0,350	0,0707	1,12	1,20	0,985
0,335	0,370	0,0779	1,18	1,26	1,094
0,355	0,395	0,0881	1,25	1,33	1,227
0,375	0,415	0,1104	1,32	1,405	1,368
0,40	0,44	0,1257	1,40	1,485	1,539

Уточняем значение эффективного проводника

$$q_{\text{эф}} = n_{\text{эл}} \cdot q_{\text{эл}}. \quad (2.22)$$

Уточняем плотность тока в обмотке статора

$$J_1 = \frac{I_{1\text{н}}}{a \cdot q_{\text{эф}}}. \quad (2.23)$$

Расчёт размеров зубцовой зоны статора и воздушного зазора

Паз статора – трапецеидальный, с углом наклона клиновой части 45° .

Предварительно принимаем индукцию в зубцах статора B_{z1} , индукцию в ярме статора B_{a1} (табл. 2.3).

Таблица 2.3

Допустимые значения индукции на разных участках
магнитопровода

Параметр	Индекс	Индукция на участке магнитопровода				
2р		2	4	6	8	10 и 12
Ярмо статора	B _a	1,4 – 1,6			1,15-1,35	1,1-1,2
Зубцы статора	B _{z1}	1,7-1,9				1,6-1,8
Ярмо ротора	B _j	<= 1,45	<=1,25	<= 1,15	<= 0,85	
Зубцы ротора	B _{z2}	1,75 – 1,85				

Ширина зубца статора:

$$b_{z1} = \frac{B_\delta \cdot t_1 \cdot l_\delta}{B_{z1} \cdot l_\delta \cdot k_c}, \quad (2.24)$$

где $k_c = 0,97$ – коэффициент заполнения сталью магнитопровода при оксидировании листов.

Полученные размеры геометрии паза округляем до десятых долей миллиметра.

Высота ярма статора

$$h_a = \frac{\Phi_\delta}{2 \cdot B_a \cdot l_\delta \cdot k_c}. \quad (2.25)$$

Принимаем высоту шлица паза статора $h_{ш}$, ширину шлица паза статора $b_{ш1}$ (по табл. 2.4 и 2.5).

Таблица 2.4

Высота шлица паза статора

h	$h_{ш1}$
≤ 132 мм	0,5
≥ 160 мм	1

Таблица 2.5

Средние значения ширины шлица паза статора $b_{ш1}$, мм

h, мм	Число полюсов 2p				
	2	4	6-8	10	12
50 – 63	1,8	1,8	1,8	–	–
71	2,0	2,0	2,0	–	–
80, 90	3,0	3,0	2,7	–	–
100, 112	3,5	3,5	3,0	–	–
132	4,0	3,5	3,5	–	–
160 – 250	4,0	3,7	3,7	–	–
280 – 315	–	–	–	4,0	4,0

Высота паза статора

$$h_{ш1} = \frac{D_a - D}{2} - h_a. \quad (2.26)$$

Ширина паза статора в нижнем основании

$$b_1 = \frac{\pi \cdot (D + 2 \cdot h_{ш1})}{Z_1} - b_{z1}. \quad (2.27)$$

Ширина паза статора в верхнем основании

$$b_2 = \frac{\pi \cdot (D + 2 \cdot h_{ш1} - b_{ш1}) - Z_1 \cdot b_{z1}}{Z_1 - \pi}. \quad (2.28)$$

Расстояние между основаниями паза статора

$$h_1 = h_{ш1} - \left(h_{ш1} + \frac{b_2 - b_{ш1}}{2} \right). \quad (2.29)$$

Площадь поперечного сечения корпусной изоляции в пазу

$$S_{из} = b_{из} \cdot (2 \cdot h_1 + b_1 + b_2), \quad (2.30)$$

где $b_{из} = 0,2 \cdot 10^{-3}$ м - односторонняя толщина пазовой изоляции.

Площадь поперечного сечения паза для размещения проводников

$$S_{\pi}' = \frac{b_1' + b_2'}{2} \cdot h_1' - S_{из}. \quad (2.31)$$

Коэффициент заполнения паза статора проводниками

$$k_3 = \frac{d_{из}^2 \cdot u_{\pi} \cdot n_{эл}}{S_{\pi}'}. \quad (2.32)$$

Расчёт ротора

Размер воздушного зазора δ , выбираем по рис. 2.8.

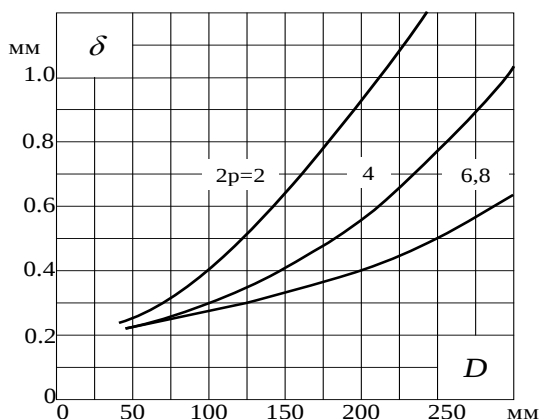


Рис. 2.8. Рекомендуемые размеры воздушного зазора

Внешний диаметр

$$D_2 = D - 2\delta. \quad (2.33)$$

Внутренний диаметр ротора равен диаметру вала, так как сердечник непосредственно насажен на вал

$$D_j = D_b = k_b \cdot D_a, \quad (2.34)$$

где $k_b = 0,23$ – коэффициент для расчета диаметра вала асинхронных двигателей по табл. 2.6.

Таблица 2.6

Коэффициенты k_b для расчёта диаметра
вала асинхронных двигателей

h, мм	50 – 63	71 – 250	280 – 355	
2р	2 – 6	2 – 8	2	4 – 12
k_b	0,19	0,23	0,22	0,23

Число пазов ротора Z_2 принимаем по табл. 2.7.

Таблица 2.7

Рекомендуемые соотношения чисел пазов

2р	Число пазов статора	Число пазов ротора		2р	Число пазов статора	Число пазов ротора
2	12	9, 15		6	36	26, 46
	18	11, 12, 15, 21, 22			54	44, 64, 66, 68
	24	15, 17, 19, 32			72	56, 58, 62, 82, 84, 86, 88
	30	22, 38			90	74, 76, 78, 80, 100, 102, 104
	36	26, 28, 44, 46		8	48	36, 44, 62, 64
	42	32, 33, 34, 50, 52			72	56, 58, 86, 88, 90
	48	38, 40, 56, 58			84	66, 70, 98, 100, 102, 104
	12	9			96	78, 82, 110, 112, 114
4	18	10, 14		10	60	44, 46, 74, 76
	24	15, 16, 17			90	68, 72, 74, 76, 104, 106, 108, 110, 112, 114
	36	26, 44, 46				
	42	52, 54			120	86, 88, 92, 94, 96, 98, 102, 104, 106, 134, 136, 138, 140, 142, 144, 146
	48	34, 38, 56, 58, 62				
	60	50, 52, 68, 70, 74				
	72	62, 64, 80, 82, 86				

Зубцовое деление

$$t_2 = \frac{\pi \cdot D_2}{Z_2} . \quad (2.35)$$

Коэффициент приведения токов

$$v_i = \frac{2m \cdot w_1 \cdot k_{об}}{Z_2} . \quad (2.36)$$

Ток в стержне ротора

$$I_2 = k_i \cdot I_{1H} \cdot v_i, \quad (2.37)$$

где k_i – коэффициент, учитывающий влияние тока намагничивания и сопротивления обмоток на отношение I_{1H} / I_2 по рис. 2.9.

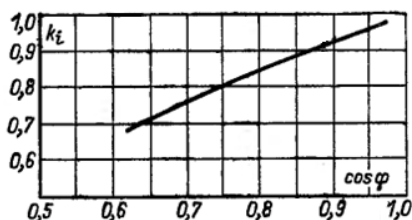


Рис. 2.9. Значение коэффициента k_i

Площадь поперечного сечения стержня

$$q_c = \frac{I_2}{J_2}, \quad (2.38)$$

где $J_2 = 3,5 \cdot 10^6$ А/м² – плотность тока в стержне литой клетки (залитка алюминием).

Принимаем форму паза ротора, ширину шлица паза ротора $b_{ш2}$, высоту шлица паза ротора $h_{ш2}$ по рекомендациям табл. 2.8.

Ширина зубца ротора

$$b_{z2} = \frac{B_\delta \cdot t_2}{B_{z2} \cdot k_c}, \quad (2.39)$$

где B_{z2} – допустимая индукция в зубце ротора по рекомендациям табл. 2.3.

Таблица 2.8

Размеры шлица паза ротора

Высота оси, h	Форма паза	$b_{ш2}$, мм	$h_{ш2}$, мм	$h'_{ш}$, мм	
				2p=2	2p>=4
≤100 мм	грушевидный полузакрытый	1	0,5	-	-
112-132 мм	грушевидный полузакрытый	1,5	0,75	-	-
160-250 мм	грушевидный закрытый	1,5	0,5	1 – 1,5	0,3

Диаметр большей окружности паза ротора

$$b_1 = \frac{\pi(D_2 - 2h_{\text{ш2}}) - Z_2 \cdot b_{z2}}{\pi + Z_2}. \quad (2.40)$$

Диаметр меньшей окружности паза ротора

$$b_2 = \sqrt{\frac{b_1^2 \left(\frac{Z_2}{\pi} + \frac{\pi}{2} \right) - 4q_c}{\frac{Z_2}{\pi} - \frac{\pi}{2}}}. \quad (2.41)$$

Расстояние между центрами окружностей паза ротора

$$h_1 = (b_1 - b_2) \frac{Z_2}{2\pi}. \quad (2.42)$$

Высота паза

$$h_{\text{п2}} = h_{\text{ш2}} + \frac{b_1}{2} + h_1 + \frac{b_2}{2}. \quad (2.43)$$

В отчёте привести распечатку расчёта АД из системы компьютерной алгебры.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ДЛЯ ДОМАШНЕЙ ПОДГОТОВКИ

1. Какие обмотки статора асинхронного двигателя бывают, и по каким критериям выбирают обмотку при проектировании?

2. Почему зубцы статора и ротора стараются делать прямоугольными?

3. В чём разница между открытыми и полужакрытыми пазами статора, какие предпочтительнее использовать при проектировании двигателя и почему?

4. Почему число пазов статора не может быть равно (кратно) числу пазов ротора?

5. Из каких соображений не используют проводники круглого сечения диаметром более 1,4 мм в обмотках статора?

Лабораторная работа № 3

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ САПР ДЛЯ ПОДГОТОВКИ ЧЕРТЕЖЕЙ ДЕТАЛЕЙ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Получение практических навыков оформления чертежей в соответствии с государственными стандартами в инженерных САПР системах по данным из справочников и проектных расчётов.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЯСНЕНИЯ

После этапа предварительного расчёта геометрии электромеханического изделия, необходимо их уточнить. В настоящее время уточнение производится с помощью конечно-элементного моделирования. При этом создаётся виртуальная компьютерная модель, которая и подвергается исследованию. Компьютерная модель представляет собой геометрию активных частей проектируемого изделия. В зависимости от типа поля, которое моделируется, набор начальных условий и геометрических объектов может различаться.

Для создания геометрии активных частей можно воспользоваться встроенными графическими редакторами систем КЭ-расчёта (САМ-системами) или произвести импорт геометрии из CAD-систем.

Помимо создания геометрии моделей, CAD-системы (САПР) широко используются при конструировании деталей и узлов электромеханических изделий, а также при подготовке документации (чертежей) по ним.

Для рассмотренных целей широкое распространение получили следующие САПР системы: AutoCad, NanoCad, Компас-3D, Solidwoks и другие.

Рассмотрим систему автоматизированного проектирования NanoCad Plus. Данный программный продукт является отечест-

венным аналогом САПР системы AutoCAD, что позволяет предприятиям перейти на него без переобучения рабочего персонала. NanoCAD Plus – это САПР, изначально настроенная на работу с отечественными стандартами. В программе уже реализованы текстовые и размерные стили для работы с чертежными шрифтами по ГОСТ 2.304-81, а размеры работают как по СПДС, так и по ЕСКД стандартам. При этом в AutoCAD для использования отечественных стандартов, необходимо использовать дополнительный платный модуль СПДС.

NanoCad предназначается для создания и редактирования векторных примитивов (графических элементов) и более сложных объектов, состоящих из них (блоков, размеров и т. д.). Имеется возможность вставки и использования в качестве подложки файлов растровых изображений. NanoCAD содержит встроенные средства просмотра различной 3D-геометрии, содержащейся в готовом файле *.dwg. NanoCad имеет функционал для создания элементарных 3D-каркасных и поверхностных моделей, возможности которого используются специальными приложениями. Пользователь может также вести оформление рабочей документации по чертежам и проекциям 3D-моделей, созданным в различных 3D-САПР.

NanoCad предназначается как для работы индивидуально пользователя, так и для работы проектных коллективов, с использованием функционала внешних ссылок и возможностью интеграции в системы инженерного документооборота, в том числе в системы PDM/PLM.

NanoCad позволяет:

- создавать и редактировать различные 2D- и 3D-векторные примитивы, тексты, объекты оформления чертежа, настройки графического отображения и печати графической технической документации;
- создавать и использовать любые виды таблиц и выполнять специфицирование элементов чертежа по атрибутивным данным блоков и объектов оформления;
- производить настройки рабочей среды для оформления рабочей документации по различным стандартам;

- вести полноценную работу в 3D-пространстве модели и 2D-пространстве листа посредством видовых экранов;
- просматривать, создавать и редактировать поверхностные 3D-модели. Создавать пользовательскую координатную систему для редактирования и геометрической привязки к 3D-объектам;
- осуществлять полноценное сотрудничество и взаимодействие с коллегами-проектировщиками, выполняющими чертежи в других самых распространенных САПР, посредством использования единого формата файла *.dwg;
- использовать при проектировании ранее выполненную любую техническую документацию, хранящуюся в электронном растровом формате (сканированные чертежи, тексты, таблицы, фотографии);
- выполнять печать готовых технических документов на любые установленные в операционной системе устройства печати.

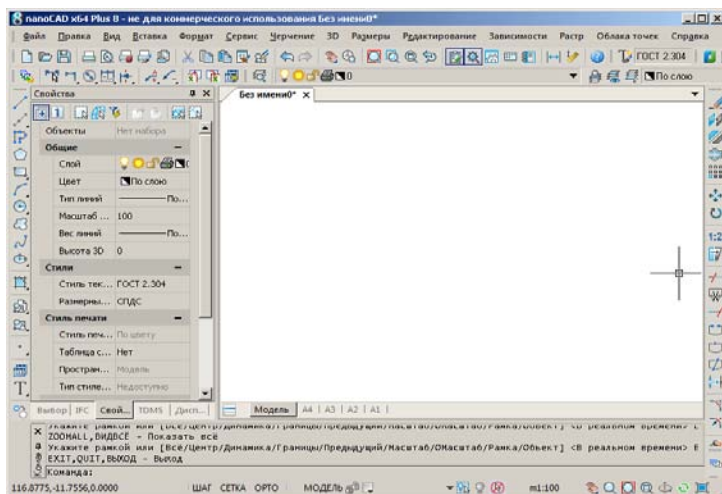


Рис. 3.1. Интерфейс программы NanoCAD Plus

Интерфейс программы (рис. 3.1) выполнен в классическом стиле и состоит из следующих типовых элементов: строка заголовков, строка меню, инструментальные панели, рабочая область и строка состояния.

3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

На основании размеров активных частей двигателя, полученных в ходе выполнения лабораторных работ № 1 и №2, построим чертежи листов статора и ротора двигателя в САПР *NanoCad*. Ниже приводится порядок построения чертежа паза трапецеидальной формы со скруглёнными углами.

Создадим новый документ: Ctrl+N.

Для построения листа магнитопровода статора с помощью инструмента **Окружность** чертим две окружности: одна размером D_{a1} , вторая – D_{Π} .

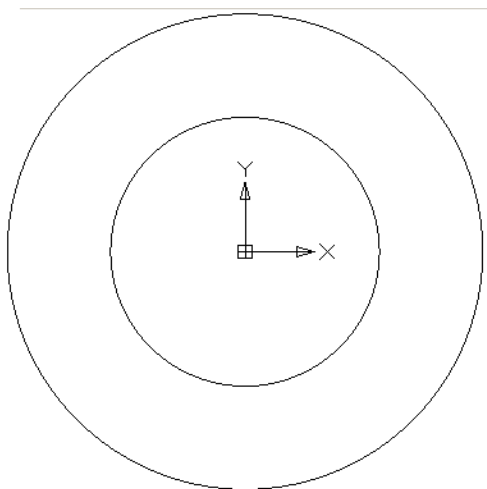


Рис. 3.2. Окружности под статор

Примечание: буквенные обозначения в данной лабораторной работе соответствуют обозначениям из ЛР №1.

Рисуем паз. Для этого по оси y от воздушного зазора $h+e$, перпендикулярно этой линии с нижней стороны откладываем $m/2$ в обе стороны, с верхнего конца – $b_2/2$. От нижних горизонтальных линий откладываем вертикальный отрезок длиной e и проводим горизонтальный отрезок до осевой линии. Отсту-

пим от точки пересечения построенного отрезка и осевой (вверх расстояние равное $b_1/2$) и построим окружность диаметром b_1 . Построим отрезок касательный к окружности с одной стороны и впадающий в верхнюю горизонтальную линию.

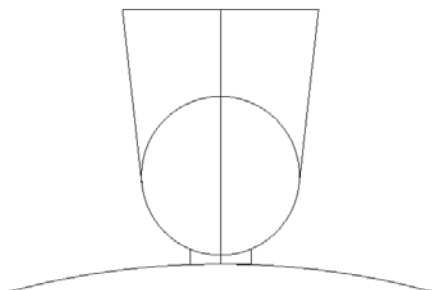


Рис. 3.3. Создание паза статора

Применим операцию *сопряжение* с радиусом 1 мм к верхним углам паза. Удалим все лишние линии и кривые с помощью команды *быстрая обрезка*.

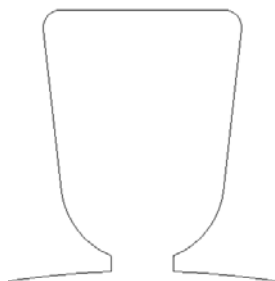


Рис. 3.4. Готовый паз статора

Выделим получившийся паз и применим операцию *массив*. В открывшемся окне (рис. 3.5) выберем *круговой массив*, укажем число элементов Z_1 , в качестве центра оставим начало координат.

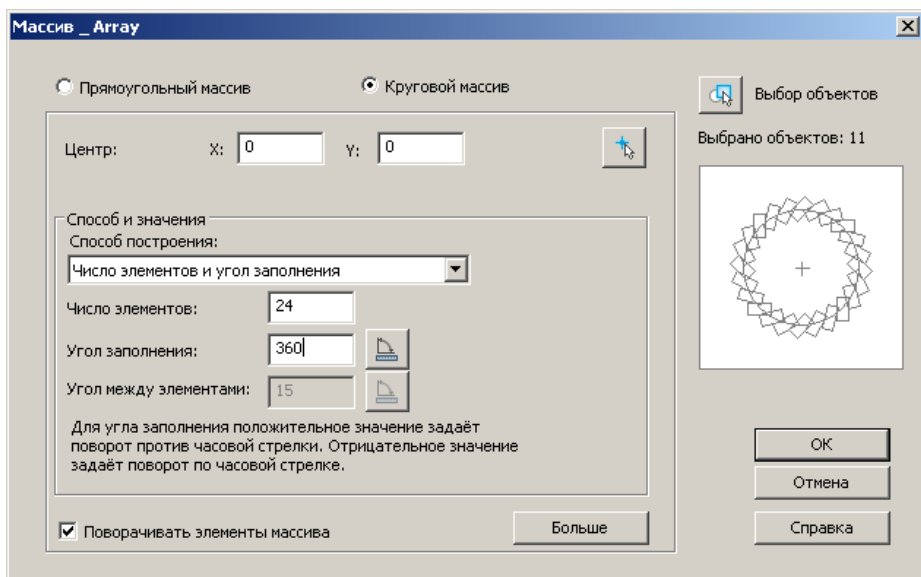


Рис. 3.5. Окно операции копирования

После копирования удалим все лишние линии, нарисует осевые.

Выделим паз и скопируем его в отдельное место на чертеже. Применим к скопированному пазу операцию масштабирования таким образом, чтобы чертёж вписался в лист размера А4.

Проставим размеры на чертеже (рис. 3.7).

Построим рамку чертежа и начертим штамп (основная надпись чертежа) на листе. Для этого воспользуемся пунктом меню **Сервис – Инструменты**. Откроется окно инструменты (рис. 3.8), в котором выбираем раздел **Блоки стандартные** из которого выбираем **Форматка ЕСКД А4** и размещаем её на рабочей плоскости.

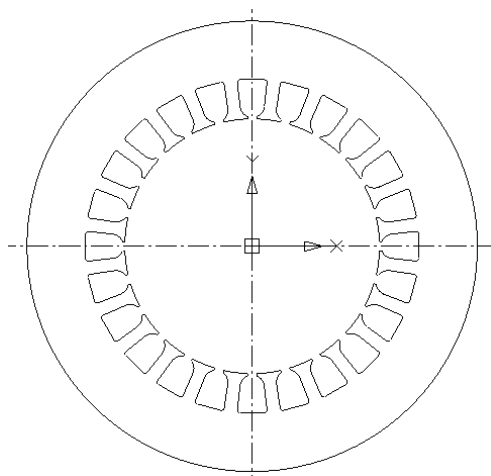


Рис. 3.6. Магнитопровод статора

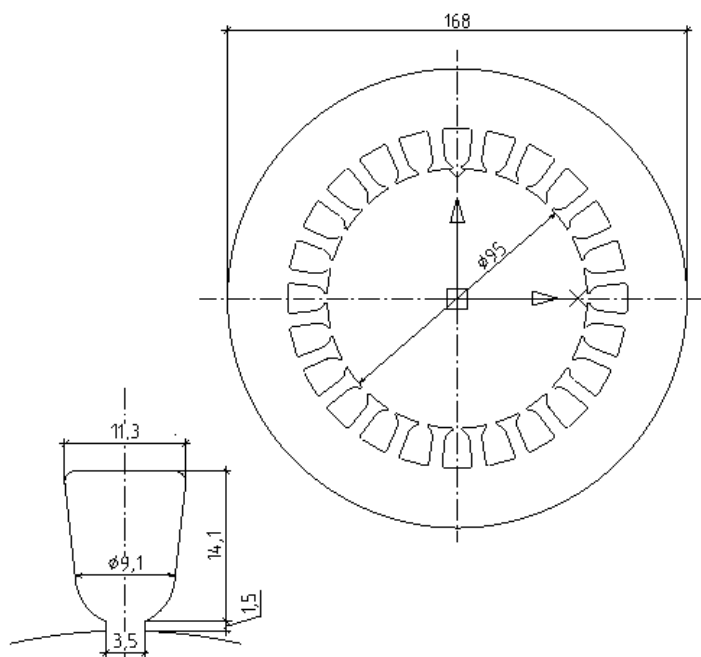


Рис. 3.7. Магнитопровод статора с размерами и вынесенным видом паза

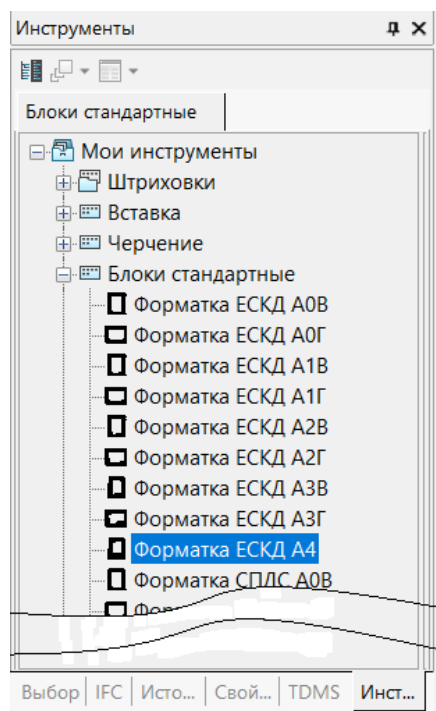


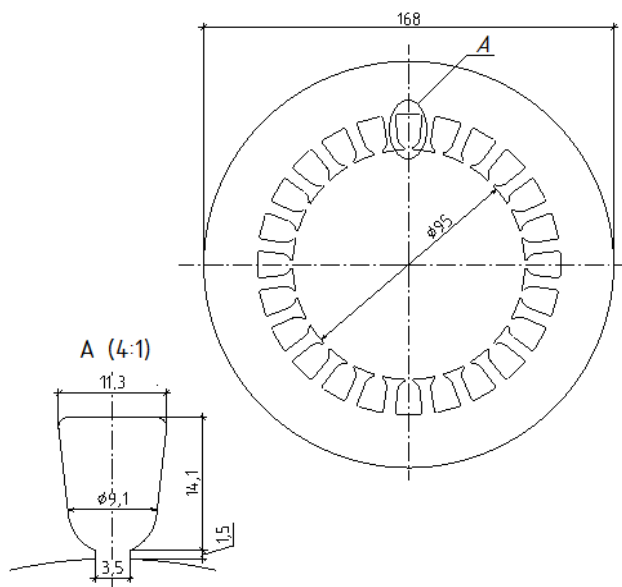
Рис. 3.8. Окно инструменты

В результате будет размещена рамка со штампом в соответствии с ГОСТ 2.104-2006. Заполним основную надпись (рис. 3.9). Для заполнения воспользуемся инструментом **Многострочный текст**.

						Приложение 1				
						Лист магнитопровода статора	Лит	Масса	Масштаб	
Изм	Лист	№ докум	Подп	Дата			У	0,05	1:1	
Разраб		ФИО								
Проб		ФИО								
Т контр							Лист	Листов		
Н контр						Сталь 2013	ФГБОУ ВО ВГТУ ФЭСУ ЭМ ЭМ-031			
Учб										

Рис. 3.9. Заполнение главной надписи чертежа

Приложение 1



					Приложение 1			
Изм	Лист	№ докум	Подп	Дата	Лист магнитопровода статора	Лит	Масса	Масштаб
Разраб		ФИО				У	0,05	1:1
Пров		ФИО						
Т.контр					Сталь 2013	Лист 1 Листов 2		
Н.контр						ФГБОУ ВО ВГТУ		
Утв						ФЭСУ ЭМ ЭМ-141		

Рис. 3.10. Пример готового чертежа листа магнитопровода статора

Построение листа магнитопровода ротора

Построим лист магнитопровода ротора. Построения производить в новом документе.

Повторим операции для построения геометрии листа магнитопровода ротора.

Начертим две окружности: первая – внешний диаметр ротора размером $(D_{II} - \delta)$, вторая – диаметр вала размером d_3 .

Начертим паз ротора по размерам.

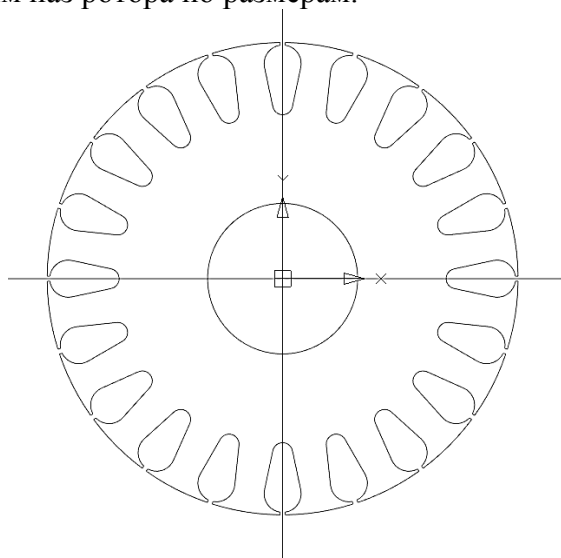


Рис. 3.11. Лист магнитопровода ротора

Для упрощения построения стенок паза, удобно использовать привязки. Для этого включим **Сервис – Режимы черчения** (рис. 3.12) на вкладке «**Объектная привязка**» устанавливаем галочку «**Касательная**».

Выделим паз и скопируем его в отдельное место на чертеже. Применим к скопированному пазу операцию масштабирования таким образом, чтобы чертёж вписался в лист размера А4. Проставим размеры на чертеже (рис. 3.13).

Построить рамку чертежа. Заполнить основную надпись.

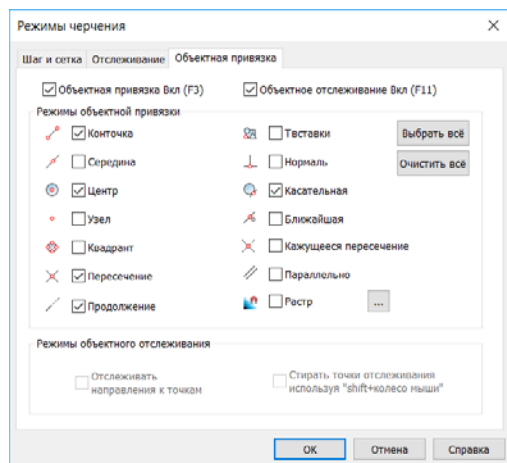


Рис. 3.12. Окно настройки режимов черчения – привязки

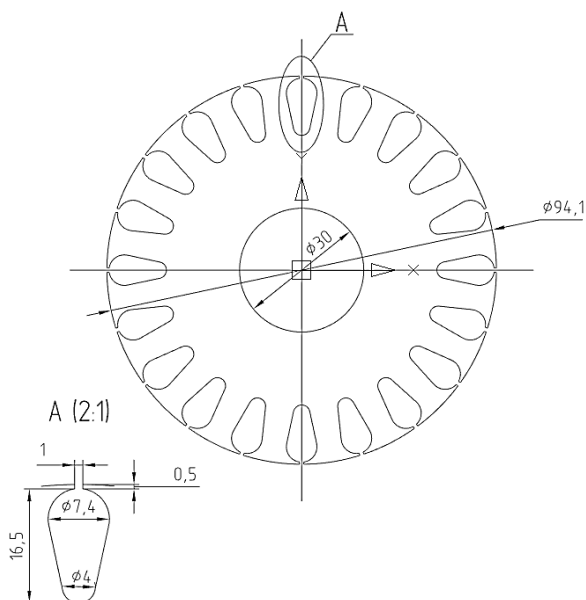


Рис. 3.13. Магнитопровод ротора с размерами и вынесенным видом паза

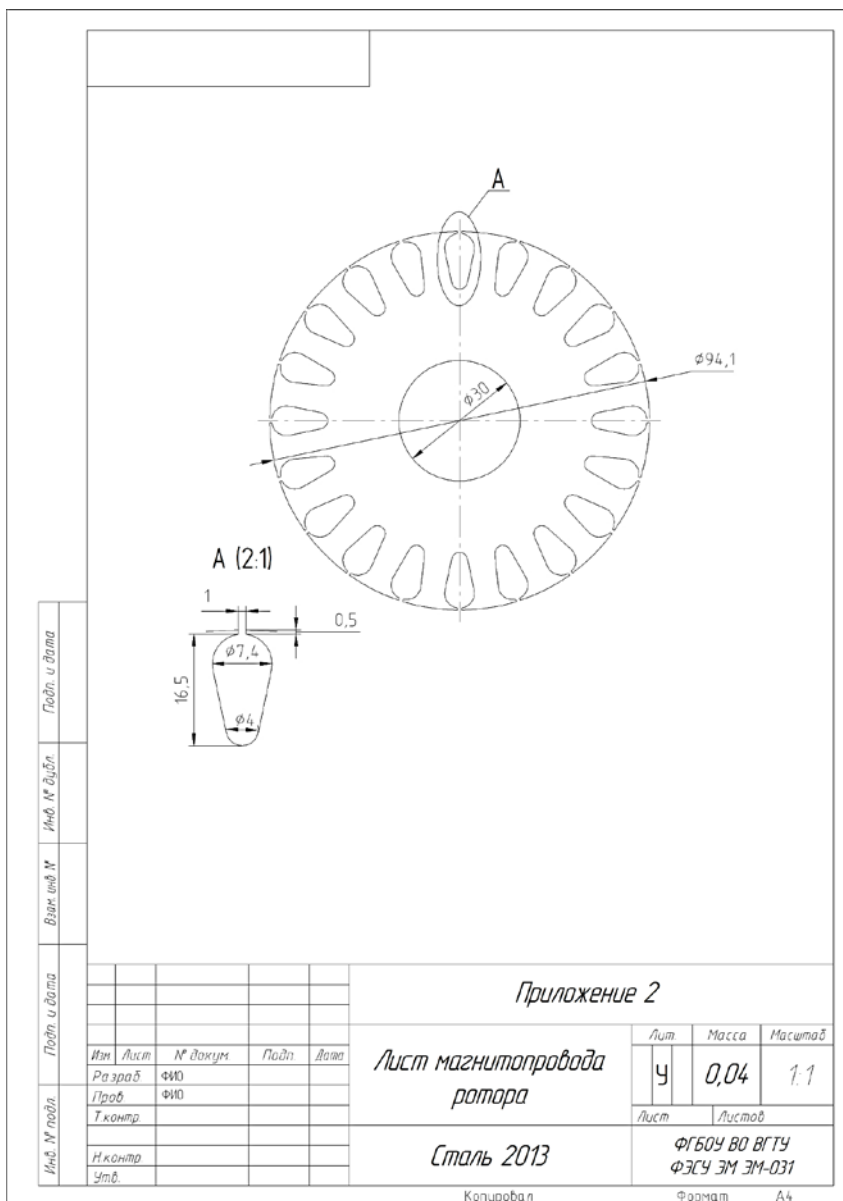


Рис. 3.14. Пример готового чертежа листа магнитопровода ротора

Построение чертежа вала двигателя

Построим чертёж вала двигателя (по данным из лабораторной работы №1). Для этого необходимо определить размеры его ступеней.

Первый этап. Построение эскиза вала.

Известны следующие размеры, представленные на рис. 3.15. Для построения эскиза вала этих данных достаточно.

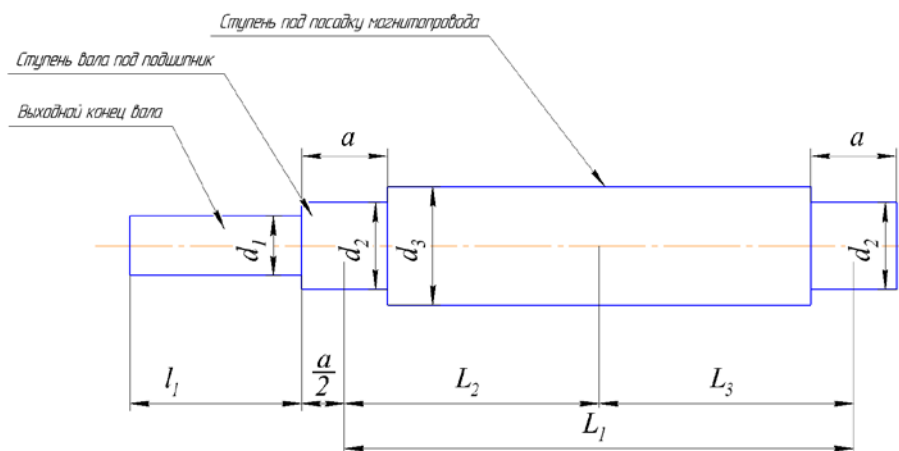


Рис. 3.15. Размеры вала электродвигателя

Второй этап. На полученную заготовку необходимо нанести дополнительные конструктивные элементы:

- шпоночный паз,
- фаски,
- канавки, упорные бурты.

1. Для того чтобы магнитопровод ротора жёстко закрепить на валу, предусматриваются упорный бурт, канавка для пружинного кольца и шпоночный паз.

На рис. 3.16 представлен эскиз установки этих элементов.

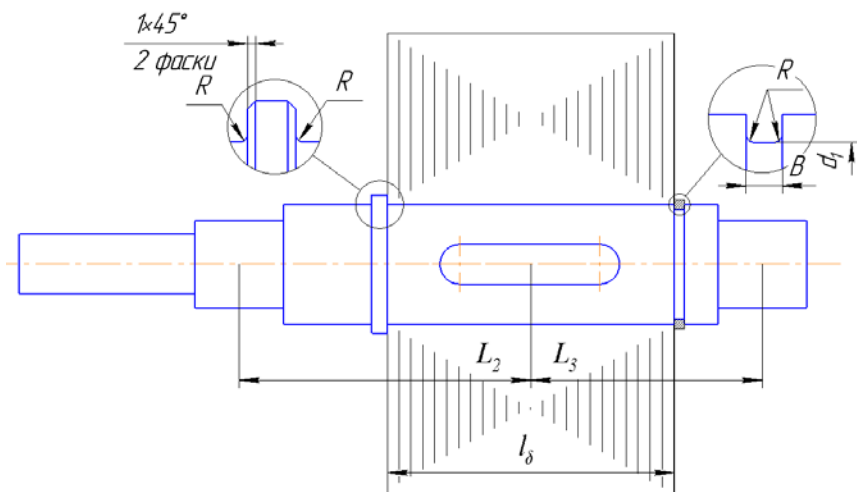


Рис. 3.16. Эскиз размещения магнитопровода на валу

Размеры упорного бурта остаются на усмотрение конструктора.

Канавки для пружинного кольца стандартны, регламентированы ГОСТ 13942-86. При построении канавок на чертеже размеры взять из ГОСТ.

Места посадки подшипников шлифуются. Для выхода шлифовального круга делаются специальные канавки (рис. 3.17.). Размеры канавок, регламентированы ГОСТ 8820-69.

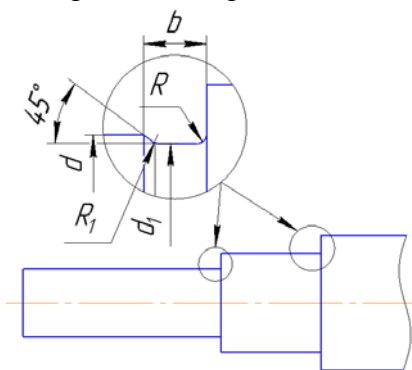


Рис. 3.17. Размещение и размеры выхода шлифовального круга

Установка шпоночных пазов. Размеры шпоночных пазов (рис. 3.18) и правильность их установки регламентирована следующими стандартами: ГОСТ 10748-79 (диаметры ступеней вала от 30мм до 500 мм) и ГОСТ 23360-78 (диаметры ступеней вала от 6мм до 500 мм).

Кроме этого могут устанавливаться сегментные шпонки, правила установки которых регламентированы ГОСТ 24071-97.

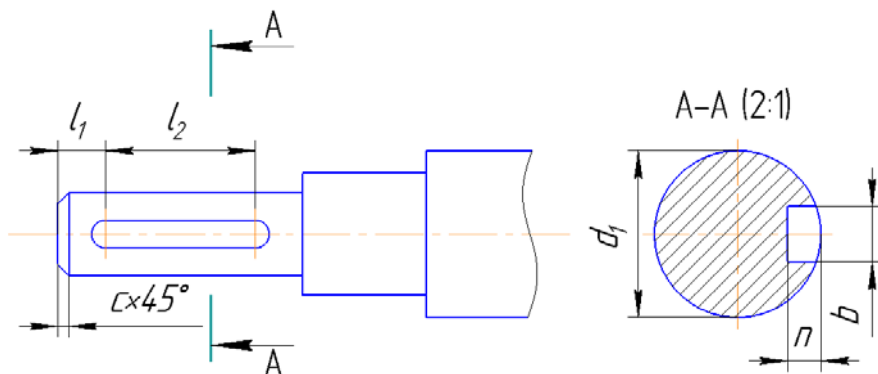


Рис. 3.18. Размеры шпоночных пазов

Фаски выполняются согласно требованиям ГОСТ 10948-64, который представляет ряд размеров допустимых фасок.

Третий этап. Нанесение размеров на вал.

Пример результата работы представлен на рис. 3.19.

В отчёте должны быть представлены следующие чертежи:

- 1) лист магнитопровода статора (по данным ЛР №1);
- 2) лист магнитопровода ротора (по данным ЛР №1);
- 3) вал двигателя (по данным ЛР №1);
- 4) лист магнитопровода статора (по данным ЛР №2);
- 5) лист магнитопровода статора (по данным ЛР №2).

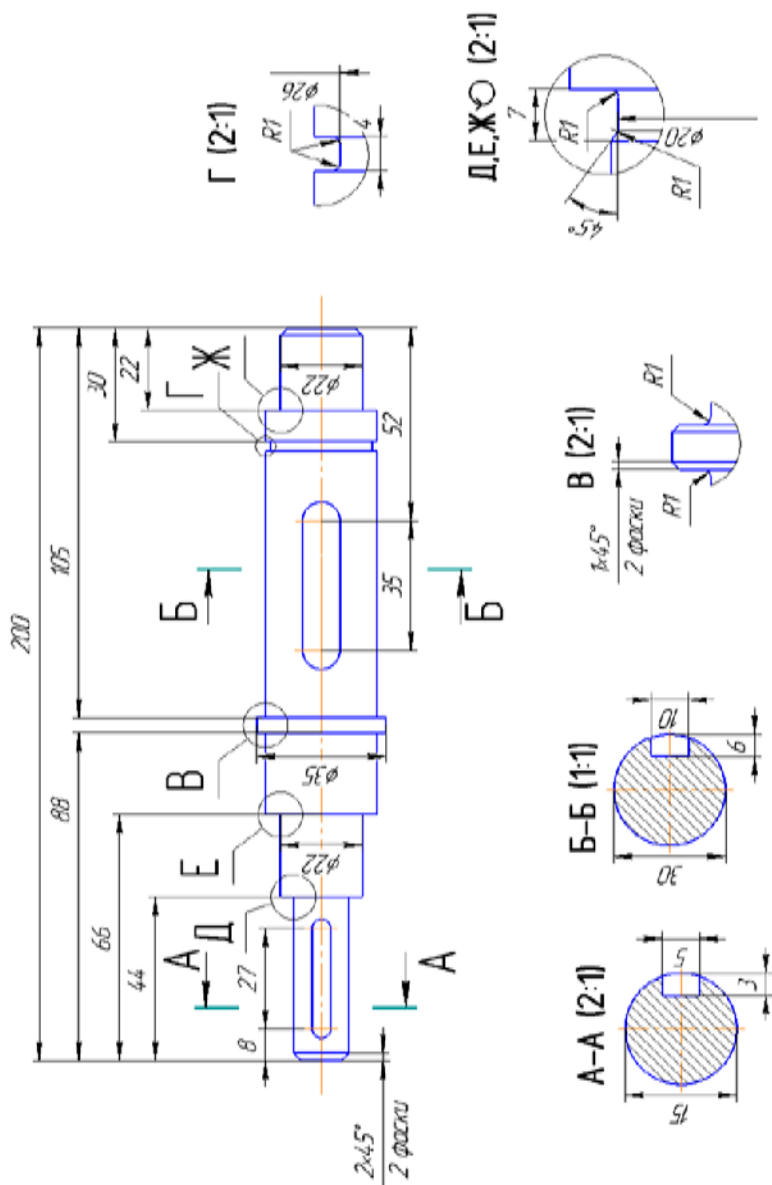


Рис. 3.19. Пример готового чертежа вала

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ДЛЯ ДОМАШНЕЙ ПОДГОТОВКИ

1. Какие способы посадки магнитопровода ротора на вал вы знаете, в каких случаях они применяются?
2. Что такое галтели на валу, для чего они применяются?
3. Как правильно заполняется главная надпись чертежа?
4. Правила выбора шпонок для сочленения деталей с валом?
5. Как правильно выполнить сечение тела?

Лабораторная работа № 4

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ САПР ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ СХЕМ ОБМОТОК

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Получение практических навыков использования САПР систем для построения схем обмоток электрических машин.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЯСНЕНИЯ

Обмотка – это основной элемент конструкции электромеханического устройства. При моделировании ЭМУ требуется правильно задать направления токов в пазах и их фазы. При производстве по схеме обмотки будут производить её изготовление (намотку на шаблоны и укладку в пазы).

Схемы обмоток бывают двух типов – развёрнутые и торцевые. Торцевые схемы более сложны в построении, но позволяют правильно задавать схему обмотки при моделировании электрических машин при плоскопараллельной (двумерной) постановке задачи. Развёрнутые схемы в основном применяются при производстве обмоток (при их намотке).

Схематичное отображение обмотки даёт представление о форме катушечных групп, их размещении по отношению к пазам, соединению их между собой в фазы. При этом не накладываются требования на размеры линий данной схемы. Требования к построению схем обмотки изложены в ГОСТ 2.705-70 ЕСКД.

Для подготовки схем обмоток подходит любая программа, которая оперирует векторной графикой. При том, что схемы обмоток включаются в конструкторские документы, они должны выполняться в соответствии с требованиями ЕСКД. Это приводит к тому, что наиболее оптимальными для подготовки схем обмоток являются инженерские САПР, предназначенные для конструирования новых изделий: AutoCad, NanoCad, Ком-

пас-3D, Solidwoks и другие, поддерживающие отечественные стандарты.

3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

В данной лабораторной работе, необходимо построить схемы обмоток асинхронного двигателя, выдержав требования ЕСКД. Данные для построения взять из результатов выполнения лабораторных работ №1 и №2.

Используя программу САПР – NanoCad построить схемы обмоток асинхронного электродвигателя.

Построение развёрнутой схемы однослойной шаблонной обмотки

Построим обмотку со следующими параметрами:

Число пазов: $Z_1 = 12$

Число полюсов: $2p = 2$

Число фаз обмотки: $m = 3$

Для этого в новом документе создадим набор из 12 вертикальных линий, расположенных на одинаковом расстоянии друг от друга (рис. 4.1).

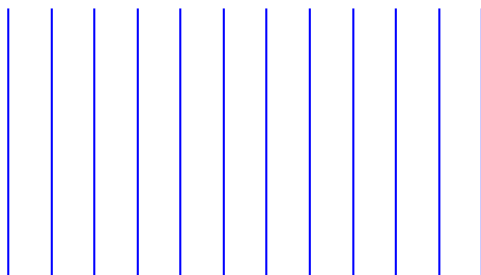


Рис. 4.1. Пазовые части катушек

Полученные линии будут являться пазовыми частями катушек обмотки, пронумеруем их.

Двигатель имеет 2 полюса, распределим полученные пазовые части обмоток по полюсам, разделив их вертикальными штрихпунктирными линиями (рис. 4.2).

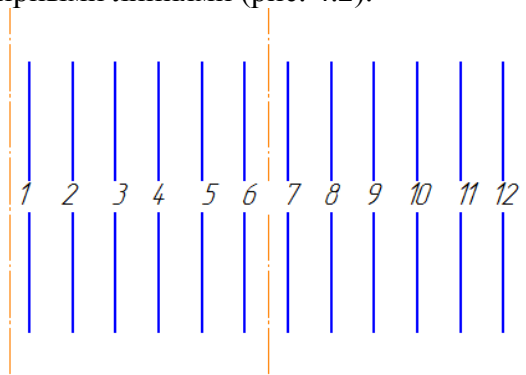


Рис. 4.2. Разделение обмотки на полюсные деления

Определим число пазов на полюс и фазу:

$$q = \frac{Z_1}{2p \cdot m} = \frac{12}{2 \cdot 3} = 2$$

Т.к. обмотка имеет целое q , можно использовать следующий приём: фазы чередуются подряд А,В,С, при этом к каждой фазе относится по q пазов. Обозначим по этому принципу все пазы, относящиеся к одной фазе (рис. 4.3).

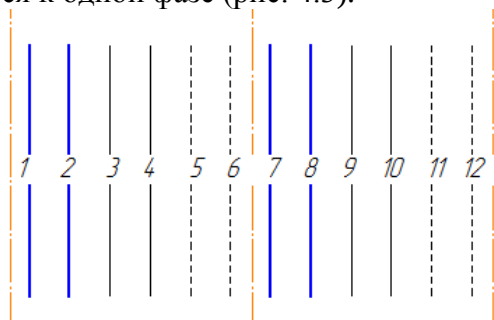


Рис. 4.3. Схематичное обозначение фаз

Соединим лобовые части катушек в соответствии с типом обмотки. Т.к. обмотка шаблонная, то она состоит из одинако-

вых катушек. Построим лобовые части фаз и продублируем операцию для всех фаз обмотки (рис. 4.4).

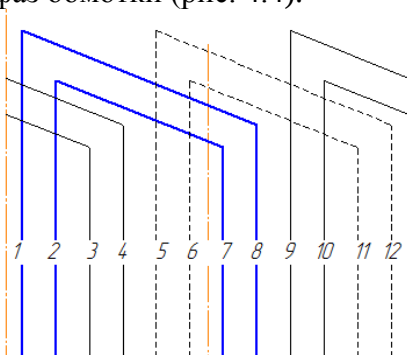


Рис. 4.4. Построение лобовых частей катушек

Достроим нижние лобовые части катушек и распределим начала и концы фаз обмоток. Подпишем концы обмоток и получим готовую обмотку (рис. 4.5).

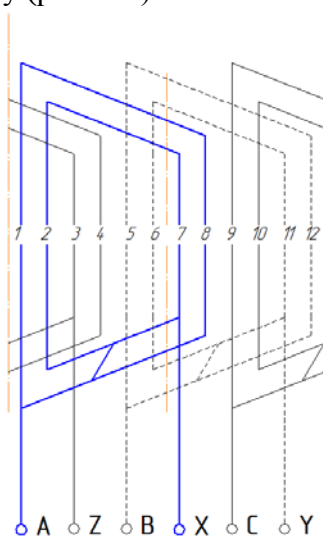


Рис. 4.5. Готовая однослойная трёхфазная шаблонная обмотка

Построение развёрнутой схемы однослойной концентрической обмотки

Построим обмотку со следующими параметрами:

Число пазов: $Z_1 = 24$

Число полюсов: $2p = 4$

Число фаз обмотки: $m = 3$

Катушки одной фазы данной обмотки выполняются разными размерами для того, чтобы расположить лобовые части. При этом обязательно, чтобы фазы были одинаковыми.

Построение обмотки начинается с построения вертикальных линий, как и для предыдущей обмотки. Повторим действия предыдущего задания до построения лобовых частей обмотки. Результат построения представлен на рис. 4.6.

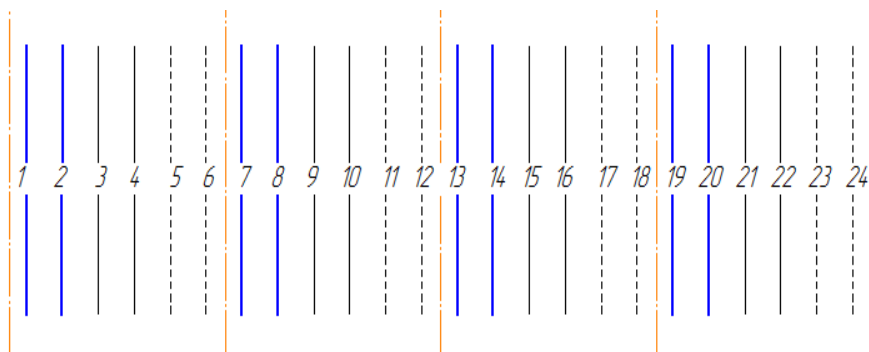


Рис. 4.6. Заготовка пазовых частей обмотки

Соединим лобовые части пазов: 1-8, 2-7 с образованием малой катушки и пазов 13-20, 14-19 с образованием большой катушки (рис. 4.7).

Получилась фаза обмотки. Соединим катушки между собой и выведем концы фазы (рис. 4.8).

Повторим операции для следующих фаз обмотки.

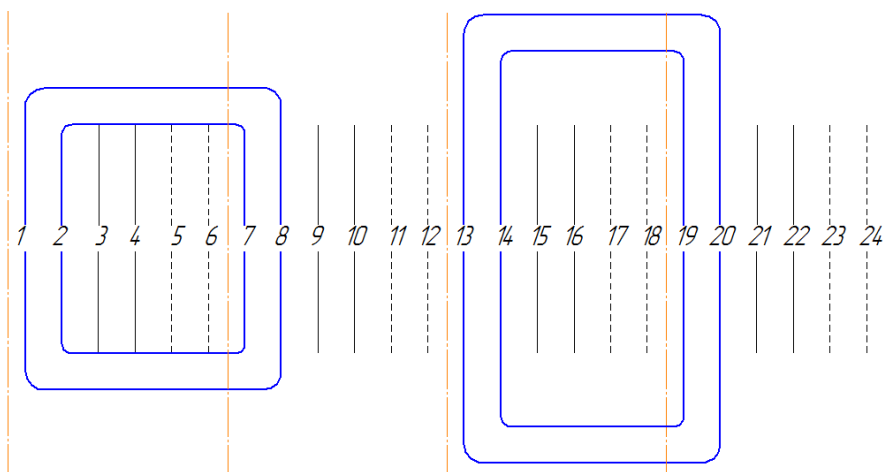


Рис. 4.7. Формирование катушек с различной длиной лобовых

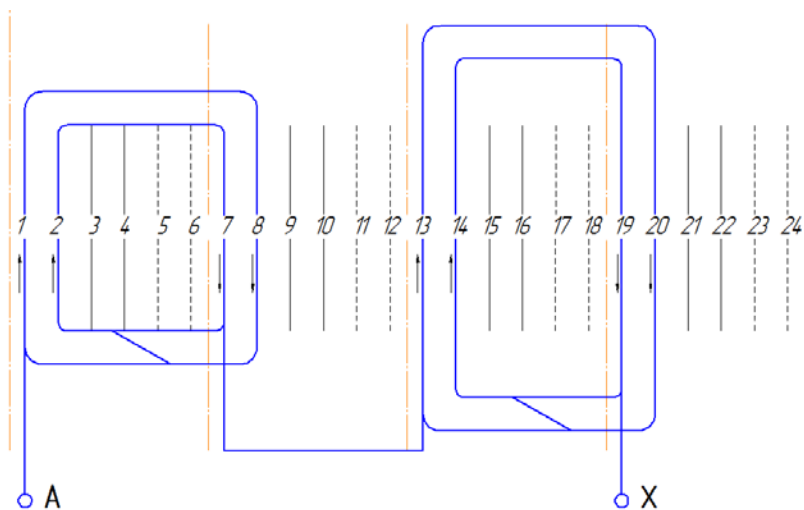


Рис. 4.8. Соединение катушек в фазу

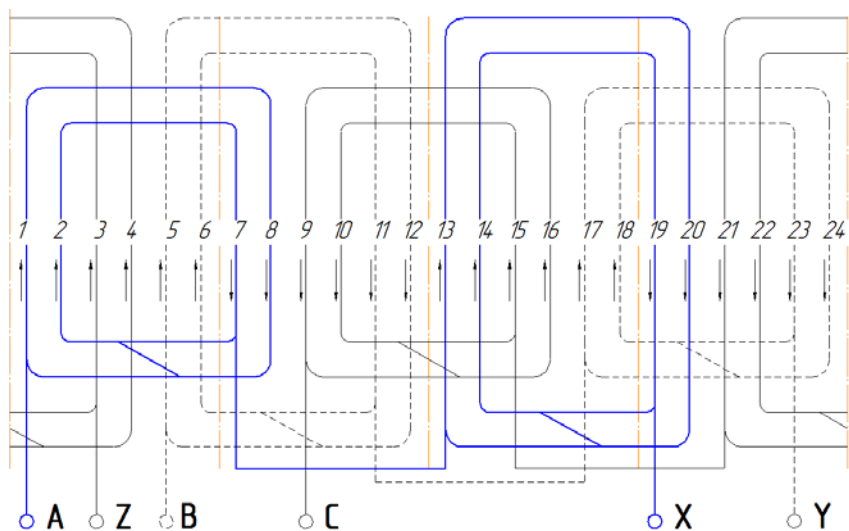


Рис. 4.9. Готовая однослойная трёхфазная
концентрическая обмотка

Для проверки правильности составления схемы обмотки, можно использовать следующий приём: обозначаем направление тока в каждом пазу. При этом следует учесть, что в фазе С ток направлен в противоположную от В сторону. Стрелки токов должны менять направление на схеме $2p$ раз.

Построение развёрнутой схемы двухслойной петлевой обмотки

Построим обмотку со следующими параметрами:

Число пазов: $Z_1 = 24$

Число полюсов: $2p = 4$

Число фаз обмотки: $m = 3$

Укорочение обмотки на 1 паз.

В случае двухслойных обмоток, паз будет состоять из двух линий для каждого слоя – своя линия. С учётом этого, должно получиться так, как показано на рис. 4.10.

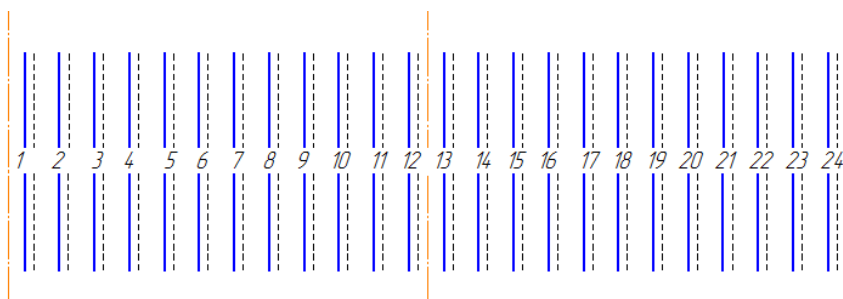


Рис. 4.10. Заготовка пазовых частей обмотки

Определим число пазов на полюс и фазу:

$$q = \frac{Z_1}{2p \cdot m} = \frac{24}{4 \cdot 3} = 2$$

Выделим фазы обмоток для основного слоя.

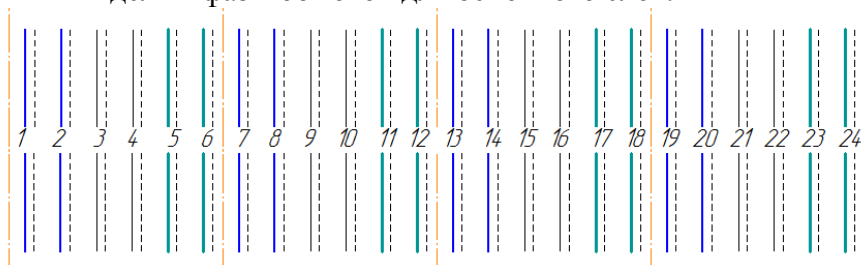


Рис. 4.11. Разделение пазов на фазы и полюсные деления

При соединении лобовых, следует учесть, что:

- лобовые соединяют различные слои обмотки,
- в двухслойных имеется укорочение/удлинение шага обмотки,
- катушки все одинаковы.

С учётом вышесказанного, соединим пазы 1-6, 2-7, 7-12, 8-13 и т.д. (рис. 4.12).

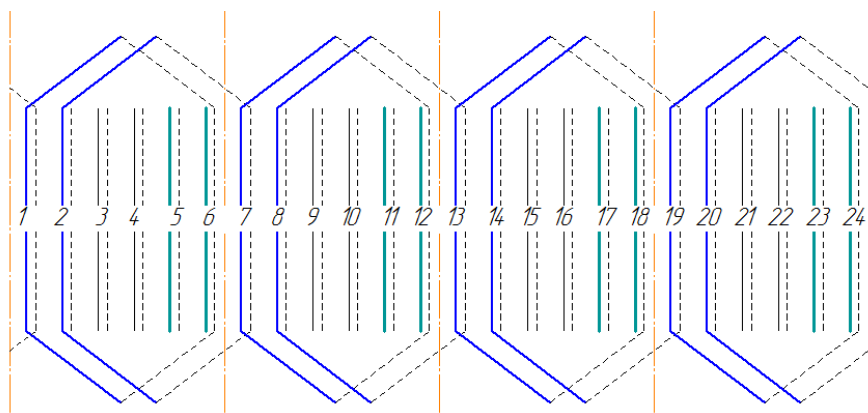


Рис. 4.12. Формирование лобовых частей катушек

Катушки между собой соединяются таким способом, чтобы в пределах одного полюса направление токов в обоих слоях обмотки было одинаковым (рис. 4.13).

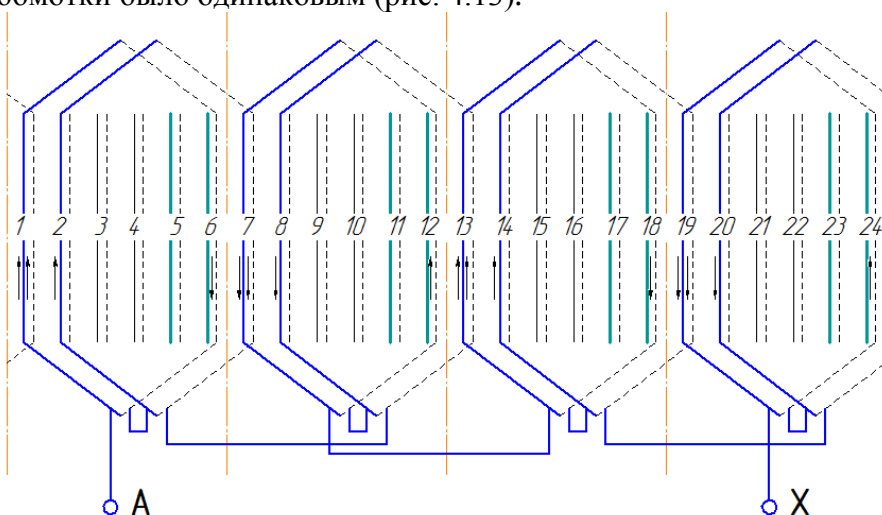


Рис. 4.13. Соединение катушек в фазу

Повторим построение для остальных фаз обмотки:

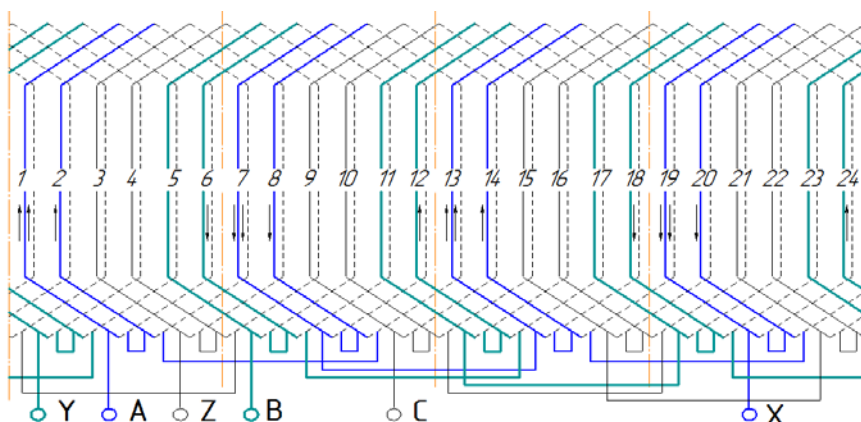


Рис. 4.14. Готовая трёхфазная двухслойная петлевая схема обмотки

Построение торцевой схемы однослойной шаблонной обмотки

Построим торцевую схему обмотки из 1-го задания лабораторной работы. Для наглядности воспользуемся эскизом листа статора с предыдущей лабораторной работы. Эскиз – необязательный элемент построения. В каждом пазу нарисуем окружность, которая будет символизировать обмотку. Так же пронумеруем пазы (рис. 4.15).

В соответствии с развёрнутой схемой обмотки, необходимо соединить следующие пазы

Проанализируем развёрнутую схему обмотки. Длина вылета лобовых у катушек различна. Можно выделить 4 различных длины вылета лобовых катушек. В связи с этим, построим 4 окружности разного диаметра с центром на оси вращения. В соответствии с развёрнутой схемой обмотки, нарисуем вылеты лобовых частей, до пересечения с окружностями. Так вылет из паза 1 будет пересекаться с самой большой окружностью, вылет паза 2 – с окружностью поменьше, вылет паза 3 – с ещё более маленькой окружностью, а вылет паза 4 – с самой маленькой. Соединяем вылеты пазов: 1-8, 2-7 дугами. В результате получилась половина катушки (рис.4.16).

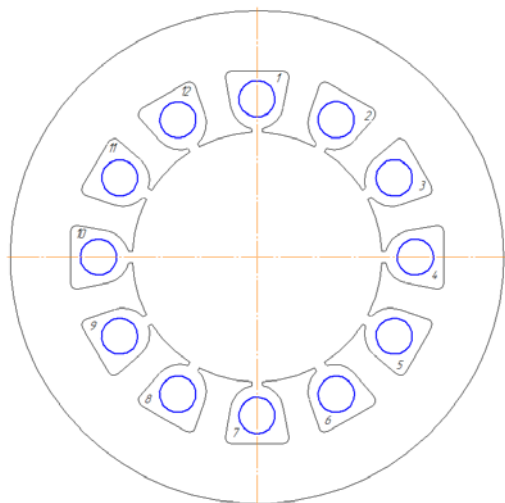


Рис. 4.15. Торцевой вид на магнетопровод

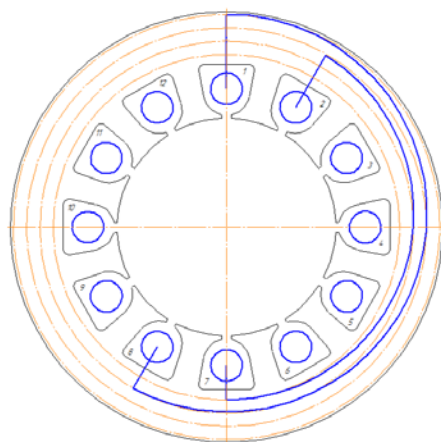


Рис. 4.16. Построение внешних частей лобовых

Повторим операции для внутренней части лобовых (рис. 4.17).

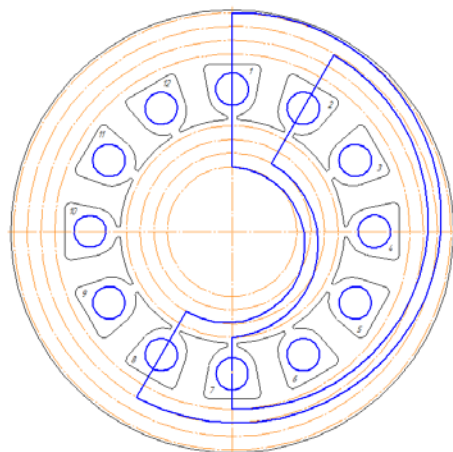


Рис. 4.17. Построение внутренних частей лобовых

Скопируем получившуюся фазу по окружности 3 раза, построим выводные концы обмоток и соединения между катушками. Фазы обозначим разными типами линий.

Получилась готовая торцевая схема однослойной обмотки (рис. 4.18).

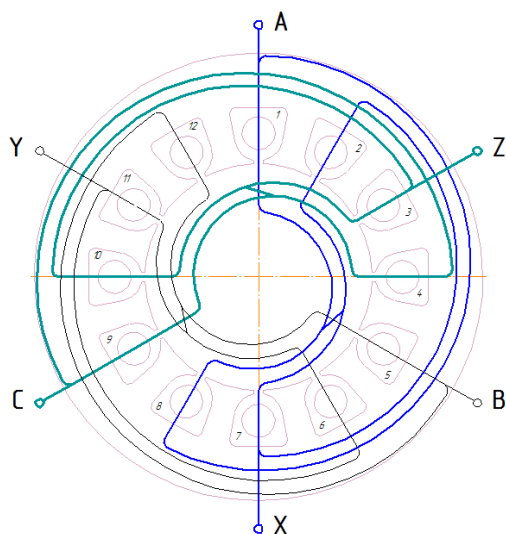


Рис. 4.18. Торцевая схема однослойной обмотки

Построение схем обмоток по индивидуальному заданию

Построить развёрнутую и торцевую схемы обмоток по заданному варианту. Данные обмоток взять из лабораторной работы 1 и 2.

В отчёте должны быть представлены следующие схемы обмоток:

- 1) развёрнутая схема однослойной шаблонной обмотки;
- 2) развёрнутая схема однослойной концентрической обмотки;
- 3) развёрнутая схема двухслойной петлевой обмотки;
- 4) торцевая схема однослойной шаблонной обмотки;
- 5) развёрнутая схема обмотки, соответствующая данным из ЛР №1;
- 6) торцевая схема обмотки, соответствующая данным из ЛР №1;
- 7) развёрнутая схема обмотки, соответствующая данным из ЛР №2;
- 8) торцевая схема обмотки, соответствующая данным из ЛР №2.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ДЛЯ ДОМАШНЕЙ ПОДГОТОВКИ

1. Как определить шаг обмотки?
2. Как на развёрнутой схеме обмотки показать число параллельных ветвей - a ?
3. Что такое укорочение обмотки, для чего оно применяется и как отображается на схемах?
4. Что такое коэффициент распределения обмотки, как определяется и что показывает?
5. Особенности построения обмоток с дробным числом q ?

Лабораторная работа № 5

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Получить практические навыки использования информационных технологий при оформлении характеристик электрических машин в соответствии с действующими стандартами.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЯСНЕНИЯ

Одним из этапов проектирования электрических машин является построение характеристик.

Формула Клосса

Одним из способов построения естественной механической характеристики асинхронного двигателя является использование упрощённой формулы Клосса. Эта формула выведена на основании Г-образной схемы замещения АД с рядом допущений.

$$M = \frac{2 \cdot M_{\max}}{\frac{s_{\text{кр}}}{s} + \frac{s}{s_{\text{кр}}}}.$$

Следует иметь в виду, что формулы Клосса достаточно точно описывают механические характеристики АД с фазным ротором. В к.з. АД, выпускаемых обычно с относительно глубокими пазами в роторе, либо с двойной клеткой ротора, имеется в той или иной степени явление вытеснения тока в стержнях ротора. Поэтому их параметры непостоянны и механические характеристики значительно отличаются от характеристик, рассчитанных по формулам Клосса. Однако эти формулы,

благодаря своей простоте, позволяют выполнять многие расчеты и делать общие заключения о свойствах и работе АД. В тех же случаях, когда необходима большая точность, должны использоваться экспериментально снятые механические характеристики. У некоторых к.з. двигателей при малых скоростях механическая характеристика имеет провал, вызванный влиянием высших гармоник поля, с чем следует считаться при пуске двигателя под нагрузкой [6].

3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Используя графопостроители или табличный процессор, построить и оформить в соответствии со стандартами графики следующих характеристик:

- механической $M = f(s)$,
- токовой $I = f(s)$,
- рабочих характеристик: $I, P_1, n, \eta, \cos \varphi = f(P_2)$.

Построение механических характеристик по формуле Клосса

Построим механическую характеристику двигателя, используя формулу Клосса:

$$M = \frac{2 \cdot M_{\max}}{\frac{s_{\text{кр}}}{s} + \frac{s}{s_{\text{кр}}}}.$$

Для построения графика есть все необходимые данные (взять из результатов выполнения лабораторной работы №1). Для построения графика потребуются:

- максимальный момент (критический): $M_{\max} = m_k$,
- критическое скольжение: $s_{\text{кр}}$.

Построение графика произведём в системе компьютерной алгебры – SMath Studio.

Для построения необходимо задать начальные значения переменных $M_{\max}$ и $s_{\text{кр}}$ и создать пользовательскую функцию, содержащую формулу Клосса.

Вставка графика на рабочее поле производится командой меню **Вставка – X-Y График**.

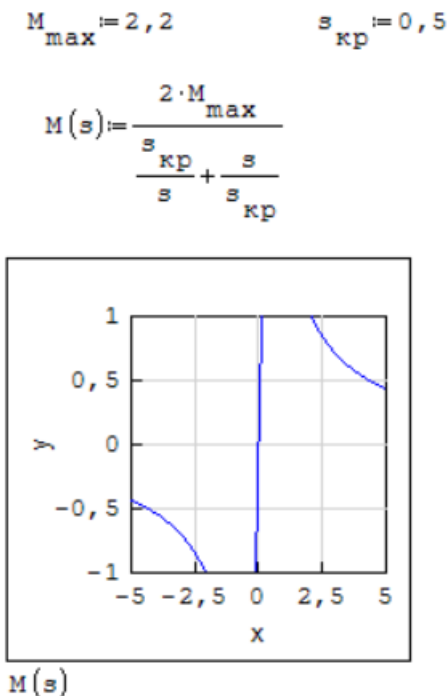


Рис. 5.1. Создание графика в системе SMATH Studio

Оформим полученный график в соответствии со стандартом. Стандарт предусматривает наличие подписей осей, стрелок на концах осей и т.д.

Отформатируем график в SMATH Studio, открыв окно настройки свойств графика (ПКМ на графике – формат).

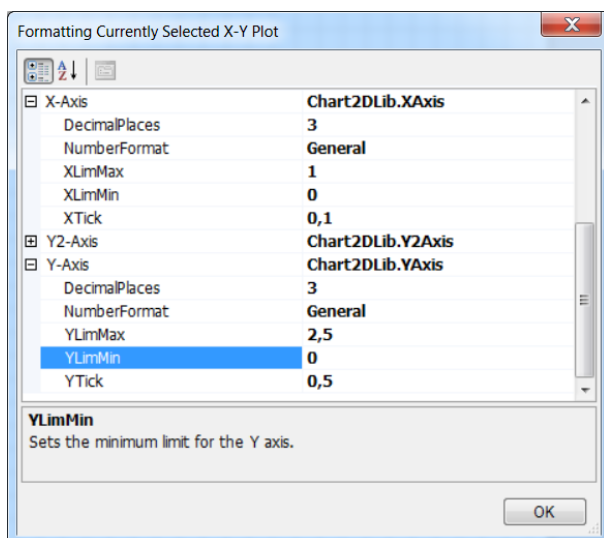


Рис. 5.2. Окно настройки свойств графика

В свойствах необходимо настроить диапазоны значений по осям X и Y. Для этого в окне настроек необходимо установить следующие свойства:

Smoothing=True	Сглаживание кривой функции
Раздел X-Axis	
XLimMax = 1	Максимальное значение на оси X
XLimMin = 0	Минимальное значение на оси X
XTick = 0,1	Шаг подписей на оси X
Раздел Y-Axis	
YLimMax = 2,5	Максимальное значение на оси Y
YLimMin = 0	Минимальное значение на оси Y
YTick = 0,5	Шаг подписей на оси Y
Раздел Grid	
GridColor = Lime	Цвет сетки – светло-зелёный

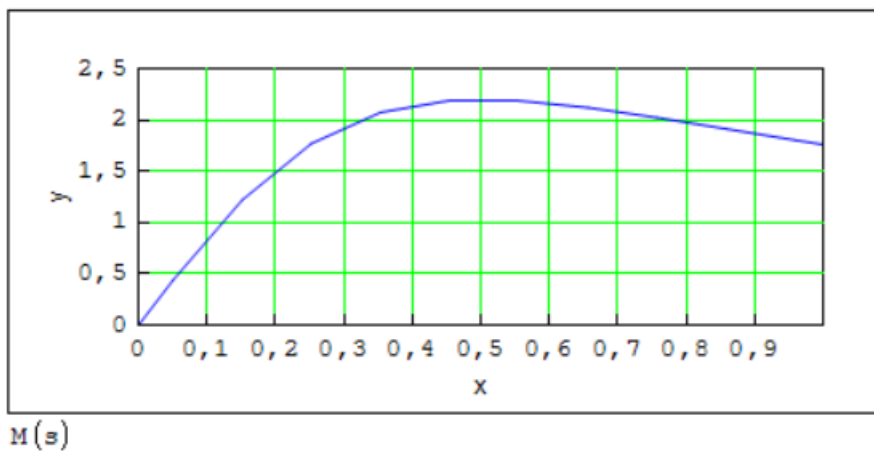


Рис. 5.3. Настроенный график

Скопируем график в программу MS Paint. Дорисуем стрелки и подпишем оси.

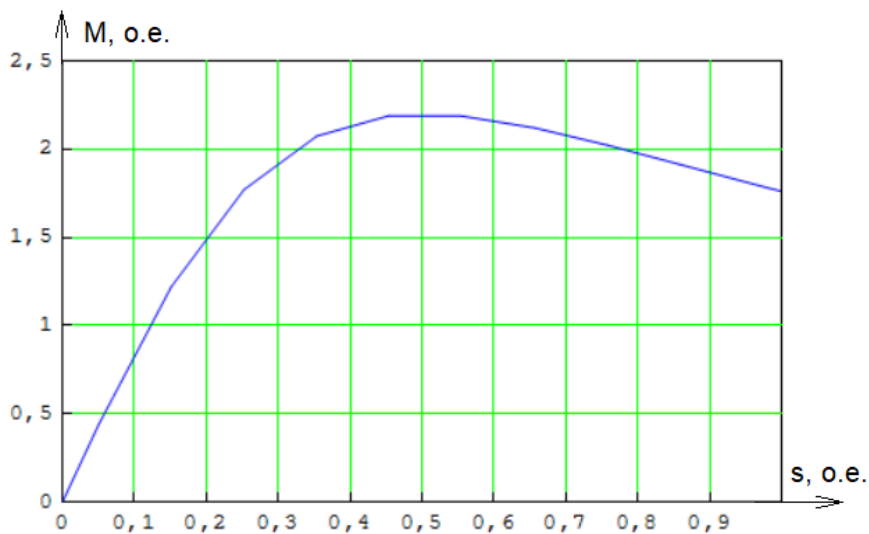


Рис. 5.4. Скорректированное оформление графика

Нанесём на график справочные данные:

- номинальный момент $M_{\text{ном}}$,
- номинальное скольжение $s_{\text{ном}}$,
- критическое скольжение $s_{\text{кр}}$,
- критический момент $M_{\text{кр}}$,
- пусковой момент $M_{\text{пуск}}$.

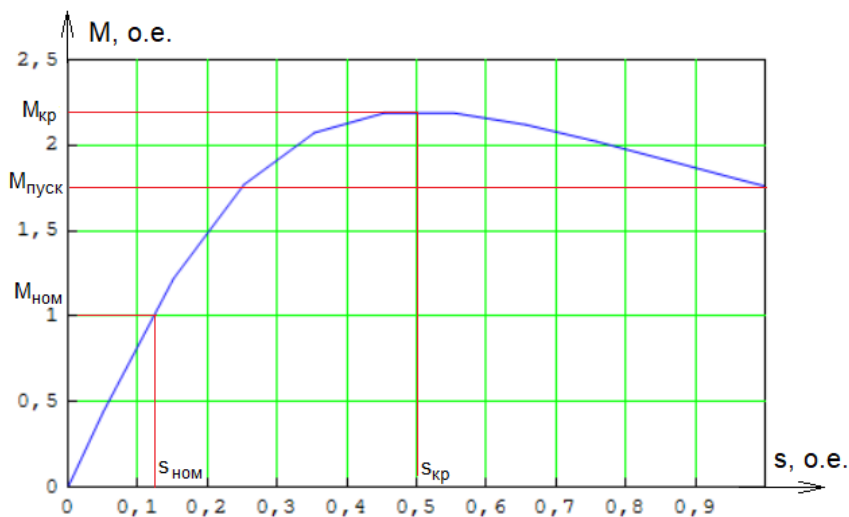


Рис. 5.5. Оформленная механическая характеристика, построенная на основании формулы Клосса

Следует отметить, что данные, полученные с такой характеристики, немного различаются со справочными. Так номинальное скольжение по справочнику $s_{\text{ном}} = 0,086$, а при расчёте по формуле Клосса получается $s_{\text{ном}} = 0,12$.

Построение характеристик по справочным данным

Механическую характеристику можно примерно построить по справочным данным. Для этого в SMATH Studio необходимо создать матрицу моментов и матрицу скольжений, после чего интерполировать полученные матрицы.

```

M_max:=2,2          s_кр:=0,5
M_ном:=1            s_ном:=0,086
M_min:=1,8          s_min:=0,8
M_пуск:=2           s_пуск:=1

MM:= $\begin{bmatrix} 0 \\ M_{\text{ном}} \\ M_{\text{max}} \\ M_{\text{мин}} \\ M_{\text{пуск}} \end{bmatrix}$     s:= $\begin{bmatrix} 0 \\ s_{\text{ном}} \\ s_{\text{кр}} \\ s_{\text{мин}} \\ s_{\text{пуск}} \end{bmatrix}$ 

f1(x):=cinterp(s ; MM ; x)

```

Построенная таким образом характеристика после оформления будет иметь вид, представленный на рис. 5.6.

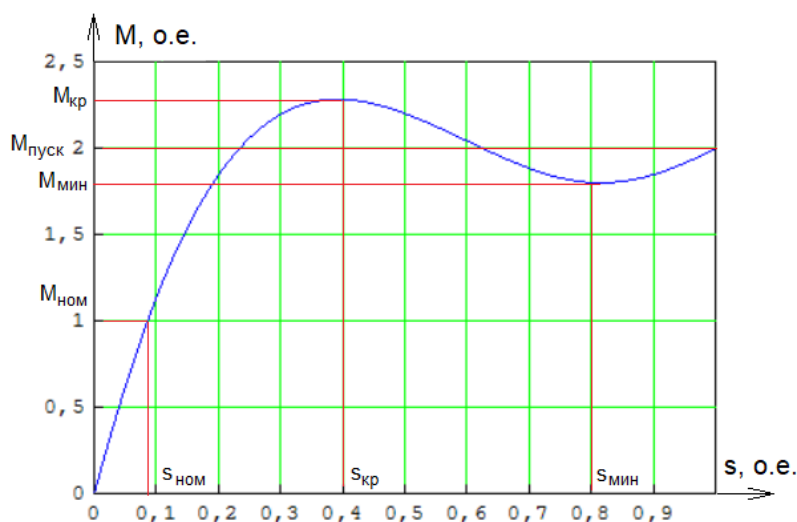


Рис. 5.6. Механическая характеристика, построенная по справочным данным

Построим токовую характеристику двигателя по справочным данным:

$$I_{\text{ном}} := 1 \quad s_{\text{ном}} := 0,086$$

$$I_{\text{пуск}} := 5,5 \quad s_{\text{пуск}} := 1$$

$$II := \begin{bmatrix} 0 \\ I_{\text{ном}} \\ I_{\text{пуск}} \end{bmatrix} \quad s := \begin{bmatrix} 0 \\ s_{\text{ном}} \\ s_{\text{пуск}} \end{bmatrix}$$

$$f2(x) := \text{cinterp}(s; II; x)$$

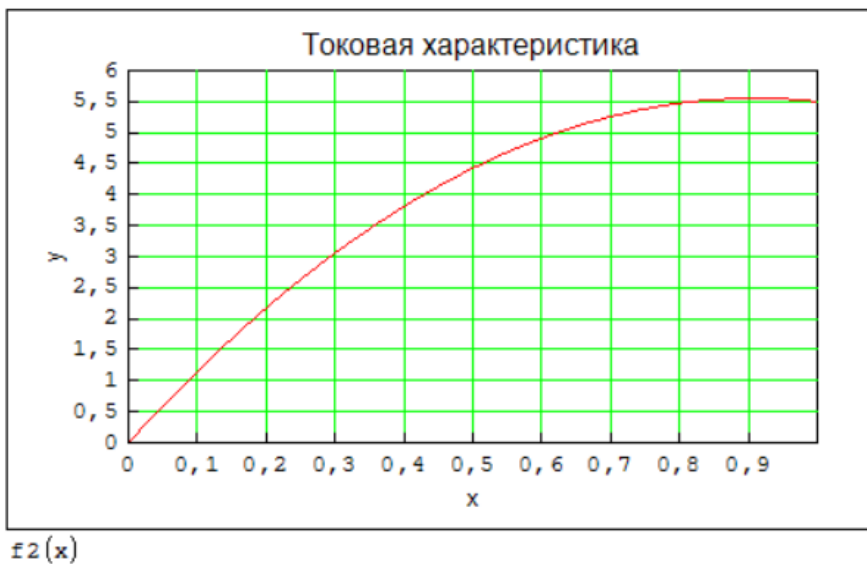


Рис. 5.7. Построение токовой характеристики

Оформим график тока в соответствии со стандартом.

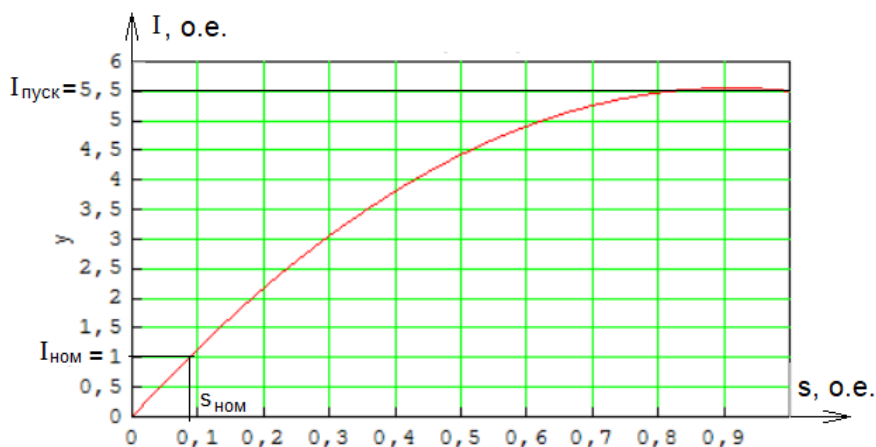


Рис. 5.8. Токовая характеристика асинхронного двигателя

Совместим механическую и токовую характеристики на одном графике (графике пусковых характеристик)

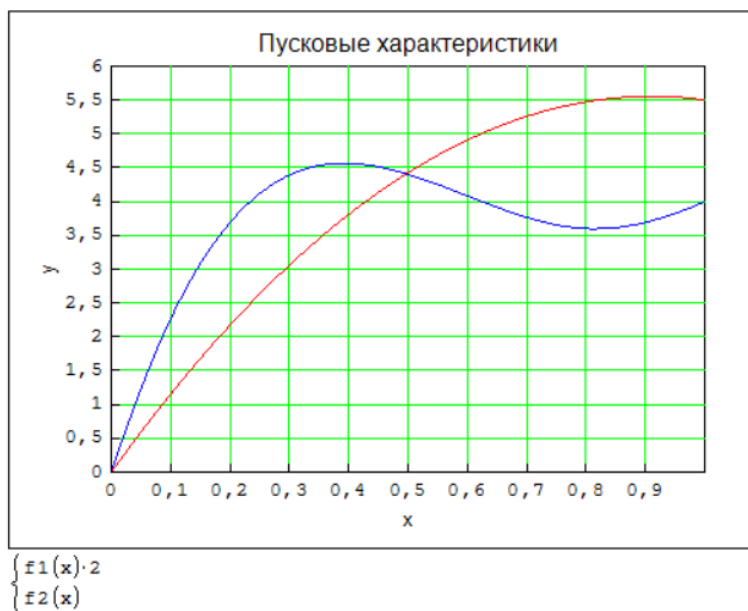


Рис. 5.9. Неоформленные пусковые характеристики

Оформим построенный график. Для каждого графика (ток и момент) необходимо построить свою координатную ось Y. Кроме этого, сами линии должны быть подписаны.

Дополнительную ось создадим в программе MS Paint копированием существующей оси.

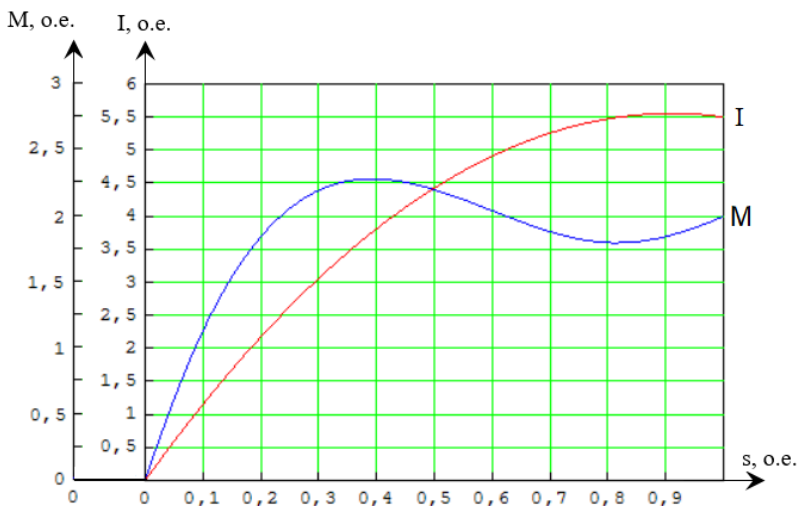


Рис. 5.10. Результат выполнения задания

Оформление характеристик в OO Calc

Повторим задание «Построение графиков по формуле Клосса» в программе OO Calc.

Создадим набор ячеек, содержащих требуемые константы будущего графика: максимальный момент и критическое скольжение.

	A	B	C
1	$M_{\max} =$	2,2	o.e.
2	$s_{\text{кр}} =$	0,5	o.e.
3			

Рис. 5.11. Ввод констант

Создадим табличку, в которой скольжение будет изменяться от 0 до 1 с шагом 0,05, а момент будет рассчитываться по формуле Клосса. По таблице строится график. Пункт меню **вставка – диаграмма**. В открывшемся окне выбираем **Диаграмма XY**.

s	M
0,01	0,09
0,05	0,44
0,10	0,85
0,15	1,21
0,20	1,52
0,25	1,76
0,30	1,94
0,35	2,07
0,40	2,15
0,45	2,19
0,50	2,20
0,55	2,19
0,60	2,16
0,65	2,13
0,70	2,08
0,75	2,03
0,80	1,98
0,85	1,92
0,90	1,87
0,95	1,81
1,00	1,76

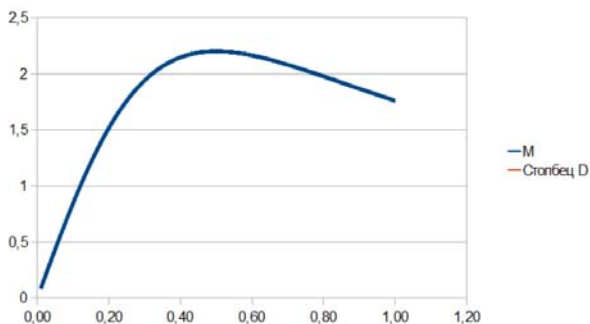


Рис. 5.12. Диаграмма в OO Calc

Произведём форматирование графика. Для этого подпишем оси, дорисуем стрелки и отредактируем сетку графика (рис. 5.13).

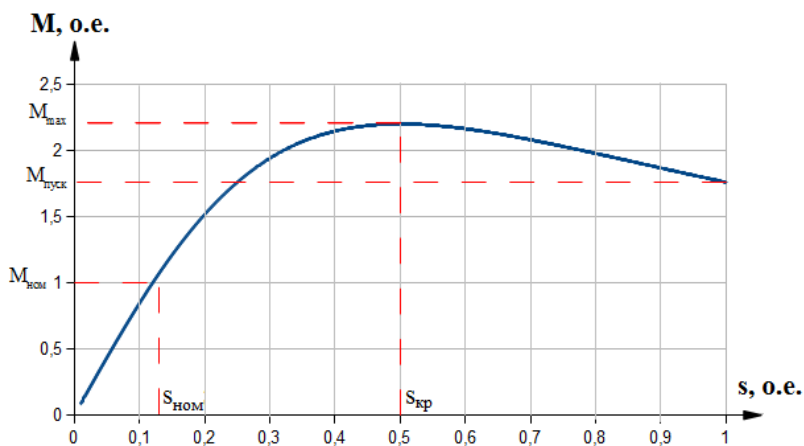


Рис. 5.13. Результат выполнения задания

Построение пусковых характеристик в NanoCad

Составим таблицу значений функции. С помощью инструмента **таблицы**  разместим на рабочем листе таблицы, содержащие значения точек графика пусковых характеристик для токов и моментов:

$s, \text{о.е.}$	$M, \text{о.е.}$	$s, \text{о.е.}$	$I, \text{о.е.}$
0	0	0	0
0,086	1	0,086	1
0,5	2,2	1	3,5
0,8	1,8		
1	2		

Рис. 5.14. Таблица значений функции

Построение осей и сетки графика.

Для построения любого графика необходимо построить оси, вдоль которых откладываются величины, и координатную сетку для размещения точек по координатам.

Прежде чем строить график, необходимо определить, как соотносятся значения величин по осям ХУ с координатной сеткой программы, которая предполагает ввод любого размера в миллиметрах.

Допустим 10 мм = 0,1 о.е. скольжения (ось Х) и 10 мм = 0,5 о.е. тока (ось Y). Построим два отрезка: один горизонтальный длиной 120 мм, а другой вертикальный длиной 90 мм с началом в середине горизонтального отрезка. На концах отрезков нарисуете стрелки и подпишем оси.

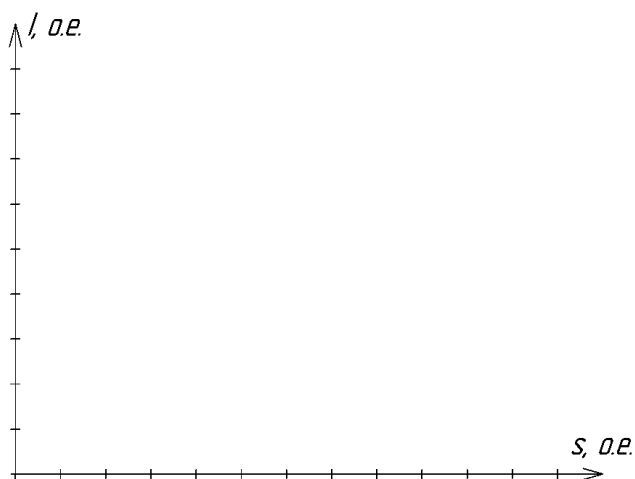


Рис. 5.15. Построение осей графика функций

Создадим из вспомогательных линий сетку, скопируем вертикальную ось со сдвигом влево на 10 мм, подпишем полученную ось как ось момента.

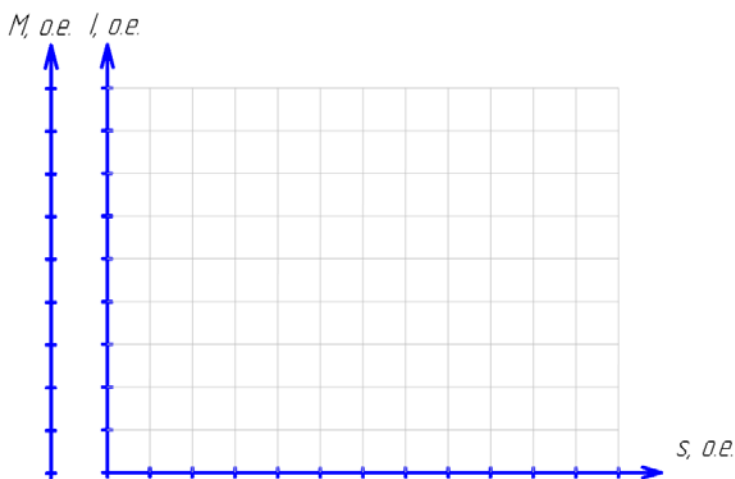


Рис. 5.16. Создание координатной сетки

Подпишем значения по осям.

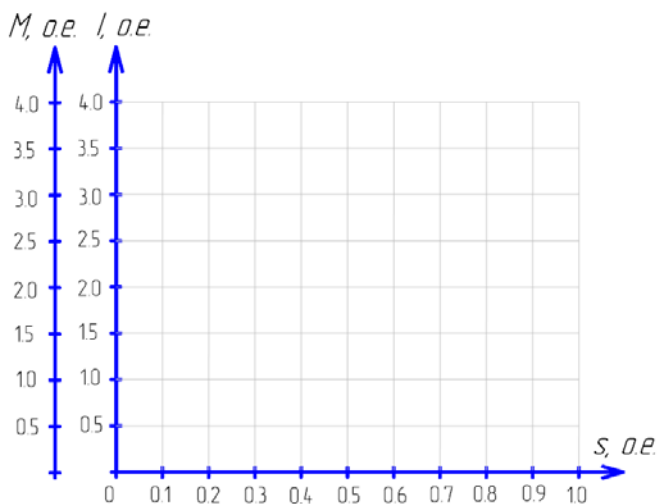


Рис. 5.17. Подписи значений по осям X и Y

В соответствии с табличными значениями, проставим точки графиков и соединим их линией типа сплайн.

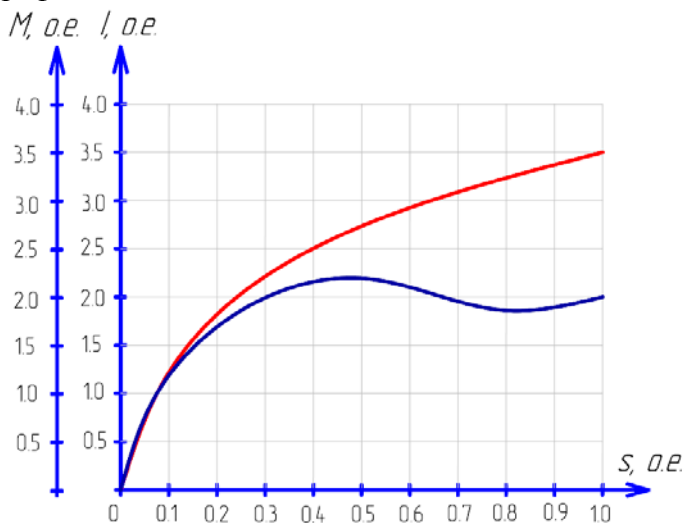


Рис. 5.18. Нанесение характеристик на полотно графика

Нанесём на график подписи линий, а также подписи точек на осях.

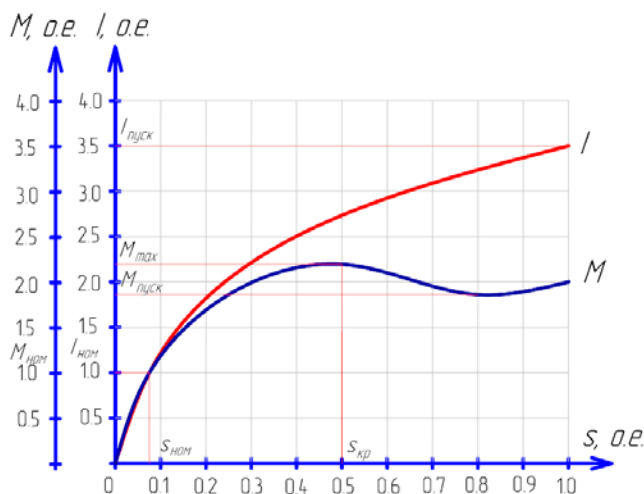


Рис. 5.19. Результат выполнения задания

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ДЛЯ ДОМАШНЕЙ ПОДГОТОВКИ

1. Что такое пусковые характеристики асинхронного двигателя?
2. Как получена формула Клосса, и какие разновидности этой формулы бывают?
3. Чем обусловлен минимальный момент на механической характеристике?
4. Какие эффекты происходят при достижении АД критического скольжения и почему?
5. Приведите варианты альтернативных способов построения пусковых характеристик?

Лабораторная работа № 6

ПРОЧНОСТНЫЕ РАСЧЁТЫ ДЕТАЛЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Получение практических навыков по использованию САПР систем для прочностного расчёта деталей электрических машин. Получение навыков по анализу правильности конструирования деталей и узлов.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЯСНЕНИЯ

Процесс разработки новых электрических машин помимо расчёта активных частей машин требует проектирования конструктивных деталей – таких как корпус, подшипниковые щиты, вал и коробки выводов и т.д. К каждой из этих деталей предъявляются требования в зависимости от цели на них возлагаемых. При этом одним из главных требований является надёжность. Не сломается ли деталь в процессе эксплуатации.

Расчёт прочностных характеристик деталей и узлов электрических машин – необходимая мера для определения возможности снижения масса-габаритных показателей, а также оценки надёжности всего изделия в целом.

Существуют два способа проведения таких расчётов: классический (на основе аналитических выкладок теоретической механики и сопротивления материалов) и численный (с использованием программных средств на основе МКЭ). При использовании численных методов уменьшается вероятность ошибки при вычислениях, повышается точность расчётов и уменьшаются затраты времени на эти расчёты. При этом в программных продуктах такого класса содержатся специальные средства для проведения оптимизационных расчётов, позволяющих снизить массу детали и повысить её прочность на ос-

нове использования интеллектуальных систем принятия решений.

Для прочностных расчётов существует большое количество CAE систем (инженерных САПР): ANSYS, Comsol, Solidworks, Elmer и другие. В настоящее время программы данного класса находят всё большее распространение во всех отраслях техники.

Рассмотрим систему КЭ-анализа Elmer. Этот программный продукт имеет несколько особенностей, выделяющих его среди программ аналогов:

- свободное распространение,
- возможность решать задачи на основе 3д моделей,
- поддержка различных типов задач,
- кроссплатформенность (независимость от типа операционной системы).

Набор решателей Elmer позволяет решать уравнения в частных производных, используя конечно-элементное моделирование для следующих физических моделей:

- теплопроводность: модели переноса тепла, излучения и фазовых переходов,
- течение жидкости: уравнение Навье-Стокса, уравнения Стокса и Рейнольдса, модель k-ε,
- уравнение переноса: конвекция и диффузия,
- теория упругости: общие уравнения упругости, модели с уменьшением размерности для плоскостей и оболочек,
- акустика: уравнение Гельмгольца, линеаризованное уравнение Навье-Стокса в частотном интервале, высокоамплитудное волновое движение, идеальный газ,
- электромагнетизм: электростатика, магнитостатика, индукция,
- микрогидродинамика: условие незалипания, уравнение Пуассона-Больцмана,
- квантовая механика: теория функционала плотности.

Пакет инструментов Elmer состоит из нескольких программ, реализующих функции предпроцессора, решателя и постпроцессора, а также графической оболочки:

- ElmerGUI – графическая оболочка, включающая генератор расчетной сетки, настройку параметров модели, а так же интерфейс для запуска расчета и визуализации результатов моделирования.

- ElmerSolver – решатель, включающий большое количество конечно-элементных инструментов для решения уравнений в частных производных.

- ElmerPost – постпроцессор для визуализации результатов моделирования. Данный инструмент в настоящее время не разрабатывается, однако с его помощью можно быстро провести оценку результатов моделирования.

- ElmerGrid позволяет создавать простые структурные расчетные сетки, а также производить модификацию существующей сетки (например, разбиение сетки для параллельных расчетов или конвертацию сетки, созданную в других генераторах сетки).

Интерфейс CAE системы Elmer (представлен на рис. 6.1) типовой для программ под ОС Windows. Имеет строку заголовков, строку меню, панели инструментов и рабочую область.

Из недостатков программы следует отметить отсутствие возможности создания и редактирования геометрии модели. При этом приложение Elmer поддерживает импорт геометрии модели из различных САПР систем. Помимо геометрии модели, система позволяет импортировать готовую КЭ-сетку, созданную в сторонних генераторах расчётных сеток.

Система Elmer позволяет работать в консольном режиме. В этом случае достигается полная автоматизация процесса моделирования.

ElmerGUI поддерживает различные форматы файлов геометрии и расчетных сеток.

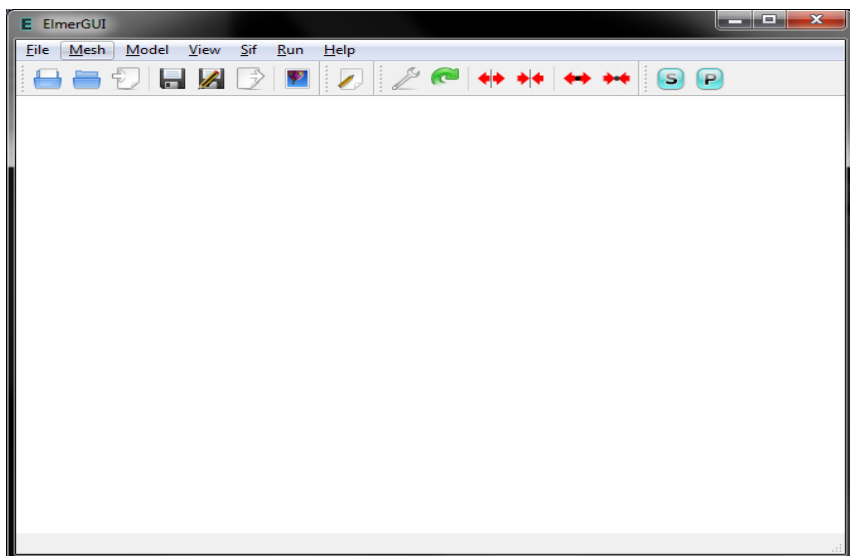


Рис. 6.1. Интерфейс программы ElmerGUI

Формат файла определяется автоматически при загрузке файла:

File - Open...

При загрузке файла с геометрией используется генератор сеток для создания расчетной сетки. Всего поддерживается три генератора: ElmerGrid (встроен), Tetgen (опционален), Netgen (встроен). После открытия файла сетку можно изменить:

Mesh - Configure...

После изменения параметров сетки ее необходимо создать заново:

Mesh - Remesh...

При возникновении проблем при генерации расчетной сетки, процедуру можно прервать:

Mesh - Terminate meshing...

Основной формат расчетных сеток Elmer является формат ElmerMesh, хранящий информацию о сетке в виде четырех текстовых файлов:

mesh.header

mesh.nodes
mesh.elements
mesh.boundary

Для загрузки и сохранения сетки в этом формате используются пункты меню:

File → Load mesh...

File → Save as...

Некоторые форматы сохраняют не всю информацию, необходимую для корректного построения расчетной сетки. Например, формат .stl (stereo lithography format) не различает границы и создает несвязанные граничные конечные элементы. Для работы с таким типом формата ElmerGUI имеет инструмент для определения границ по принципу определения острых углов. Если угол между нормальными двух соседних элементов превышает заданное значение (20 градусов по умолчанию), то элементы относятся к различным поверхностям (или ребрам). Данный инструмент запускается пунктом меню:

Mesh - Divide surface...

Mesh - Divide edge...

При необходимости несколько границ можно объединить (например, верхняя и нижняя граница канала при моделировании течения жидкости):

Mesh - Unify surface...

Mesh - Unify edge...

Объединяемые границы выбираются двойным щелчком мыши при нажатой клавише Ctrl.

Построение модели разделено на несколько этапов (некоторые этапы можно пропустить, например, если в задаче не действуют объемные силы, то этап задания объемных сил можно пропустить; задавать и отредактировать параметры можно в любом порядке):

- **Параметры модели** – определение основных параметров проведения расчетов, таких как имена входных файлов и файлов результатов, тип расчета (стационарный или нестационарный), система координат (декартова, осесимметричная, цилиндрическая).

- **Уравнения** – активация уравнений соответствующих решаемой задаче, а так же дополнительных инструментов (например, сохранение результатов расчетов в специальном формате).

- **Материалы** – указание материальных параметров, входящих в уравнения модели.

- **Объемные силы**, входящие в уравнения (например, действие силы тяжести).

- **Начальные условия** – задаются начальные значения переменных.

- **Граничные условия** – определяются условия для переменных, для каждой границы или группы границ.

После настройки всех параметров модели необходимо создать файл параметров расчетов (Sif) и сохранить проект:

Sif - Generate

File - Save project

Файл параметров расчетов можно просмотреть и при необходимости отредактировать:

Sif - Edit...

Запуск расчета:

Run → Start solver...

При использовании параллельного расчета параметры задаются в диалоговом окне:

File → Parallel setting...

В ходе расчета открывается два окна – в одном показывается информация по ходу расчета (решаемое уравнение, номер итерации, сходимость, оценка оставшегося до завершения расчета времени), а во втором графически показывается сходимость решения.

Остановить расчет можно, выбрав:

Run → Kill solver

Для визуализации можно использовать один из двух поддерживаемых постпроцессоров ElmerPost и VTK:

Run → Start postprocessor

Run → Start postprocessor (VTK)...

3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Для выполнения лабораторной работы необходимо, используя программу САПР, произвести механический расчёт вала.

Для механического расчёта вала воспользуемся данными геометрии вала из работы №3.

Создание 3d-детали для расчёта

Запустим Nanosad и создадим новый чертёж.

Создадим новый эскиз 3d-модели. Для этого выберем пункт меню **3D – 2D Эскиз – Добавить плоский эскиз**.

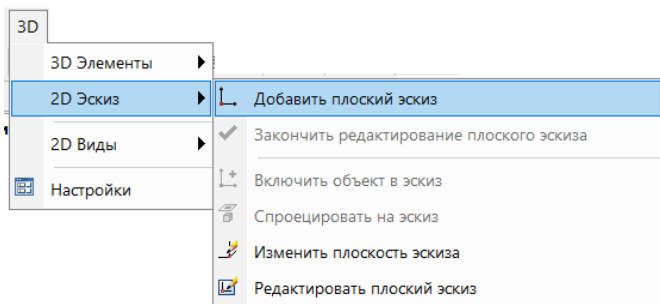


Рис. 6.2. Пункт меню создания эскиза

В поле ввода команды укажите плоскость XY и подтвердите, нажав Ввод.

Обратите внимание на окно «история 3D построений», в котором можно быстро выбрать плоскость для создания эскиза. В этом случае эскиз создаётся нажатием ПКМ на плоскости и выбором пункта «создать 2d-эскиз».

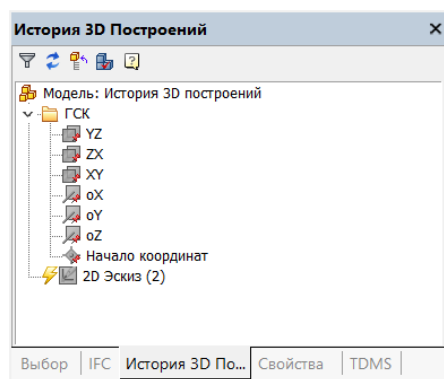


Рис. 6.3. Окно «история 3D построений»

По данным 3-ей лабораторной работы постройте контур части вала (для упрощения операции можно скопировать вал, начерченный в 3-ей работе и отредактировать).

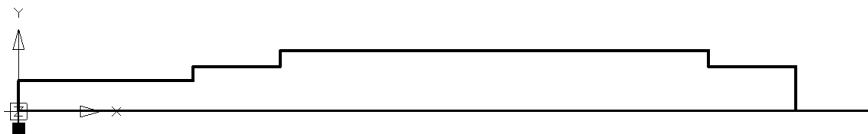


Рис. 6.4. Эскиз вала

После создания контура завершаем работу с эскизом: команда меню 3D – 2D эскиз – Закончить редактирование плоского эскиза.

Из полученного эскиза, посредством операции вращения: команда меню 3D – 3D Элементы – 3D вращение, создаём тело (вал). В открывшемся окне указываем эскиз и ось вращения. После применения получается готовый вал.

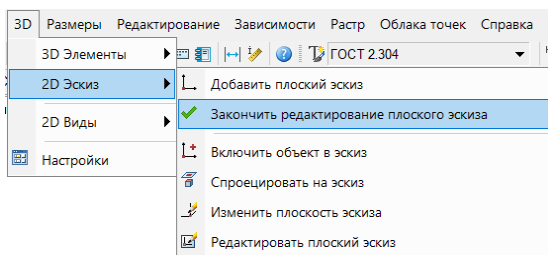


Рис. 6.5. Эскиз вала

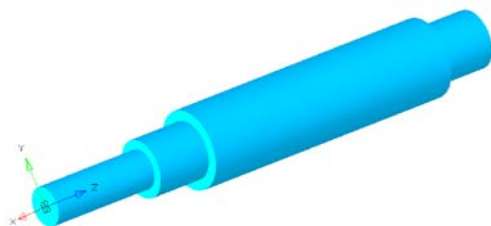


Рис. 6.6. Модель вала в 3D

Сохраним получившуюся деталь в формате IGES (*.igs), STEP (*.stp)

Подготовка модели к расчёту

Запустим программу расчёта МКЭ (Elmer).

Импортируем файл детали в программу.

Пункт меню **File – Open**. Выбираем сохранённый ранее файл. При успешном импорте геометрии откроется окно (рис. 6.7).

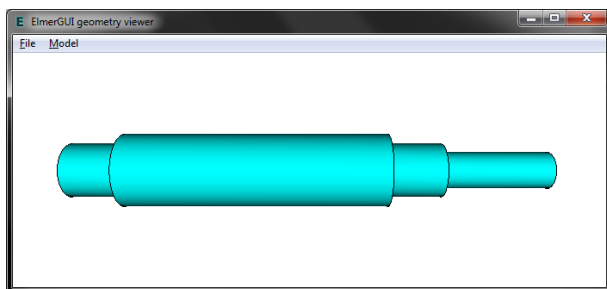


Рис. 6.7. Окно предпросмотра импортированной геометрии

Создание сетки конечных элементов

Сетка конечных элементов автоматически генерируется при импорте геометрии. Для настройки сетки КЭ необходимо в окне просмотра импортированной геометрии (ElmerGUI geometry viewer) зайти в пункт главного меню **Model – Preference**.

Сделаем сетку КЭ более мелкой (для повышения точности расчёта). Для этого необходимо увеличить число конечных элементов. В окне **Geometry Input Preference** в поле **Max. h.** (максимальный размер конечного элемента) введём значение 0,03.

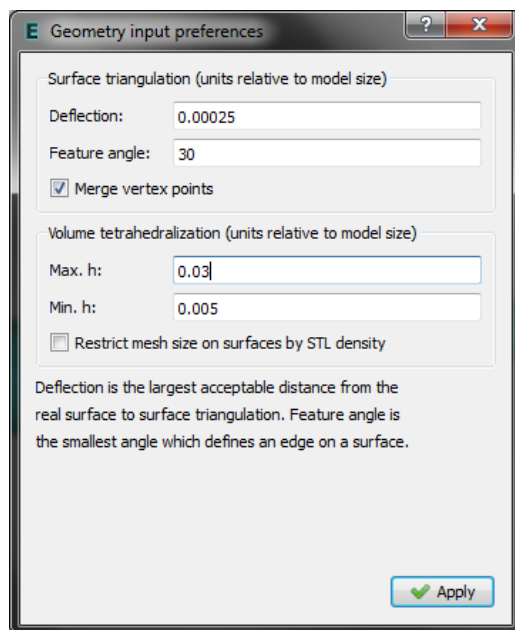


Рис. 6.8. Окно настройки размера сетки КЭ

Для принятия изменений необходимо перестроить сетку. Для этого выберем пункт меню: **Mesh – Remesh**.

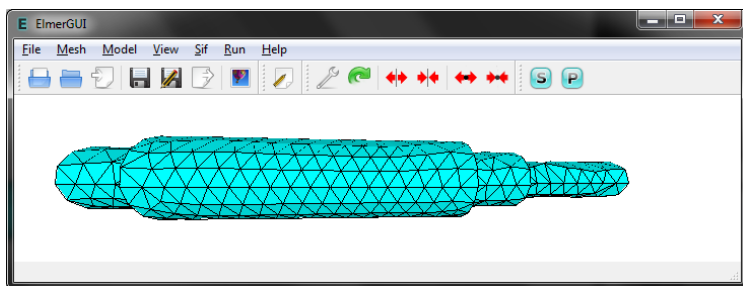


Рис. 6.9. Вал, разбитый на сетку КЭ

Настройка параметров решателя

Все общие настройки решателя сведены в окне **Setup** (рис.6.10), которое открывается через пункт меню **Model – Setup**.

В поле **Simulation Type** установим тип расчёта **Steady state** (Устойчивое состояние).

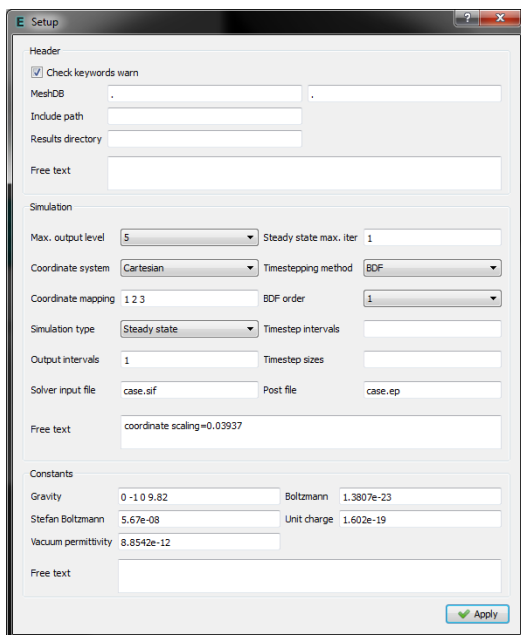


Рис. 6.10. Окно настроек решателя проекта

Настройка типа анализа

Elmer позволяет решать задачи разных типов: механические нагрузки, теплопередача, электромагнетизм, гидравлика и т.д. Для расчёта модели необходимо указать, какие типы анализа будут применяться к ней. Для этого открываем в пункт меню **Model – Equation – Add..** и выбираем задачу Linear elasticity (линейная эластичность).

Настраиваем задачу. В открывшемся окне (рис. 6.11) устанавливаем галочки:

- **Active** (активировать расчёт задачи),
- **Calculate Stresses** (расчёт напряжений),
- **Body 1** – применить настройки к телу 1 (вал).

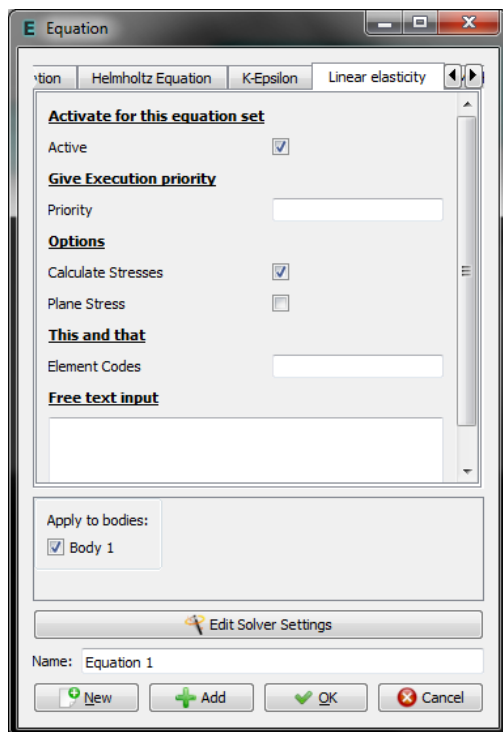


Рис. 6.11. Окно настройки задачи

Заходим в расширенные настройки решателя задачи (кнопка **Edit Solver Settings**) и указываем на вкладке **Linear system** метод решения задачи – **Direct**.

Задание материалов

Для этого заходим в пункт главного меню: **Model – Material – Add**. Откроется окно задания свойств нового материала. Открываем библиотеку материалов (кнопка **Material library**) и выбираем **Steel (carbon – generic)**. Обязательно ставим галочку **Body 1** (это означает, что материал присвоен телу 1, т.е. валу).

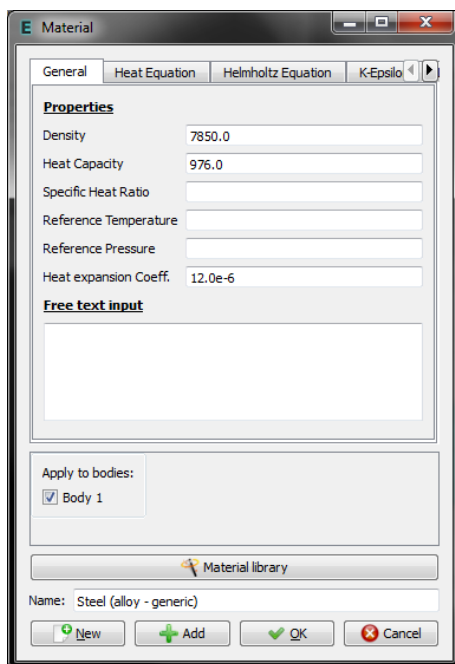


Рис. 6.12. Окно задания материалов

Задание граничных условий и запуск модели на расчёт

Задание граничных условий производится в два этапа. Сначала создаётся описание граничных условий, а затем они назначаются объектам геометрии.

Зададим закрепление подшипниковых опор.

Подшипниковые опоры блокируют смещение ступени вала в любом направлении. Создадим граничное условие, описывающее закрепление опоры.

Создадим новое граничное условие:

Model - Boundary condition – Add

На вкладке **Linear elasticity** устанавливаем **Displacement 1,2,3** (смещение по осям X,Y,Z) в ноль. Переименовываем граничное условие в **Fixed**.

Задание нагрузки от веса магнитопровода ротора

Для этого необходимо определить силу, действующую на вал. Эта сила будет рассчитываться по формуле:

$$F = m \cdot g ;$$

где m – масса ротора, кг;

$g = 9,8 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения.

Массу ротора можно приблизительно определить по формуле:

$$m = 6500 \cdot D_2^2 \cdot l_\delta ;$$

где D_2 – внешний диаметр ротора, м;

l_δ – длина магнитопровода ротора, м.

Создадим новое граничное условие (**Model – Boundary condition – Add**). На вкладке **Linear elasticity** зададим силу **F**, действующую на ступень вала под магнитопровод ротора.

- Force 1 – сила действующая вдоль оси X
- Force 2 – сила действующая вдоль оси Y
- Force 3 – сила действующая вдоль оси Z

Примечание. Сила – это векторная величина, для правильного указания приложения силы, необходимо вектор силы спроецировать на оси. Величины проекций (с учётом их знака) вписываются в вышеобозначенные поля.

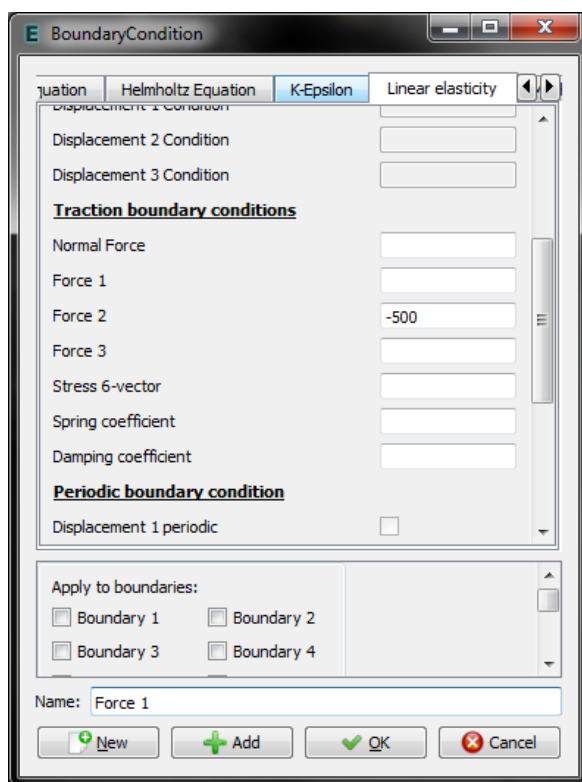


Рис. 6.13. Окно настройки граничных условий
 Указание силы, действующей на выходной конец вала
 Сила, приложенная к выходному концу вала, рассчитывается по формуле:

$$F_B = 0,3 \cdot \frac{M_{\text{ном}}}{R},$$

где $M_{\text{ном}}$ – номинальный момент двигателя на валу, Н*м;

R – радиус расположения пальцев муфты, м.

Радиус расположения пальцев муфты можно определить по ГОСТ 20761-96 (значения представлены в таблице).

Расположение пальцев муфты по ГОСТ 20761-96

Номинальный кру- тящий момент, Н*м	Диаметр вала, м	Диаметр расположе- ния пальцев муфты, м
16	11-18	55
31,5	16-22	60
63	20-28	70
125	25-36	80
160	30-38	100
250	32-45	110
400	35-50	110
630	45-60	130
1000	50-65	140
1600	60-85	160
2500	70-100	190
4000	80-110	210
6300	95-130	240
10000	110-160	280

Для присвоения выше заданных граничных условий объектам геометрии, необходимо включить режим задания граничных условий (**Model – Set boundary properties**).

После чего двойным кликом ЛКМ выделить нужную поверхность и в открывшемся окне выбрать необходимое граничное условие.

Сгенерируем файл расчёта.

Программа Elmer свои расчёты производит на основании расчётного файла. Сгенерируем файл:

Sif – Generate

Отредактируем файл задания расчёта (**Sif – Edit**). В блок Solver введём строку:

element = p:2

Сохраним файл расчёта с заменой (**case.sif**)

Сохраним проект:

File – Save...

Расчёт модели

Запускаем проект на расчёт:

Run – Start Solver

В результате откроется окно (рис. 6.14), в котором будет выведена вся информация по расчёту, показан график сходимости при решении модели, в случае ошибок – представлен их список.

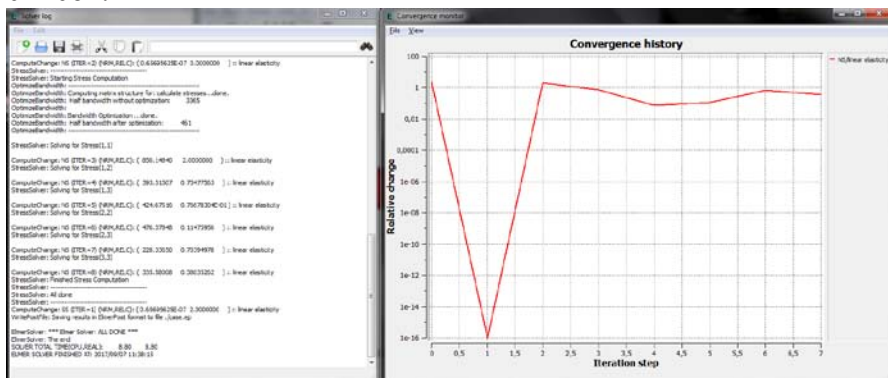


Рис. 6.14. Результаты сходимости модели

Просмотрим результаты расчёта. Для этого запустим модуль просмотра результатов расчёта:

Run –Postprocessor (VTK).

В случае, если открылось пустое окно, вручную открываем файл результатов **case.ep** (пункт меню **File - Open**).

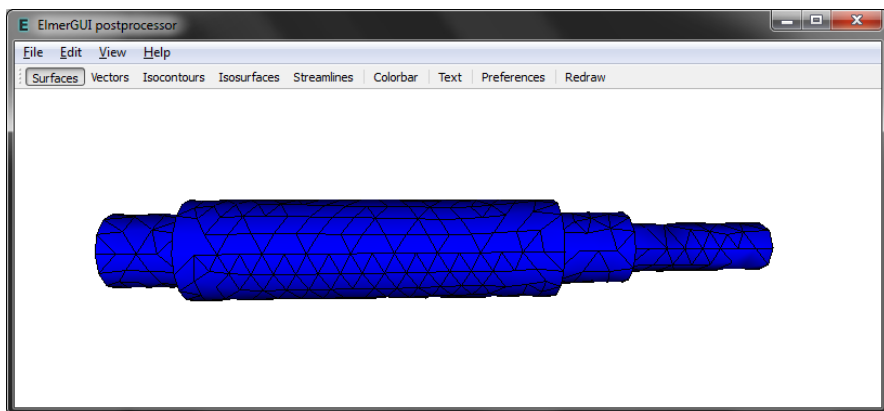


Рис. 6.15. Окно постпроцессора VTK

Отключаем отображение сетки в модели (пункт меню **View – Feature edges**)

Отображаем результаты.

Кнопка **Surfaces** на панели. В открывшемся окне выбираем пункт **Displacement_y** (смещение по оси Y).

В результате будет отображена карта смещения поверхности вала вдоль оси Y. Для отображения легенды, нажимаем на кнопку **Colorbar** и подтверждаем отображение на кнопку **Ok**.

В отчёте должны быть представлены следующие материалы:

- 1) внешний вид вала из САПР системы NanoCad,
- 2) данные о нагрузках на вал (вес магнитопровода, сила, действующая на выходной конец вала),
- 3) цветная карта деформации вала.

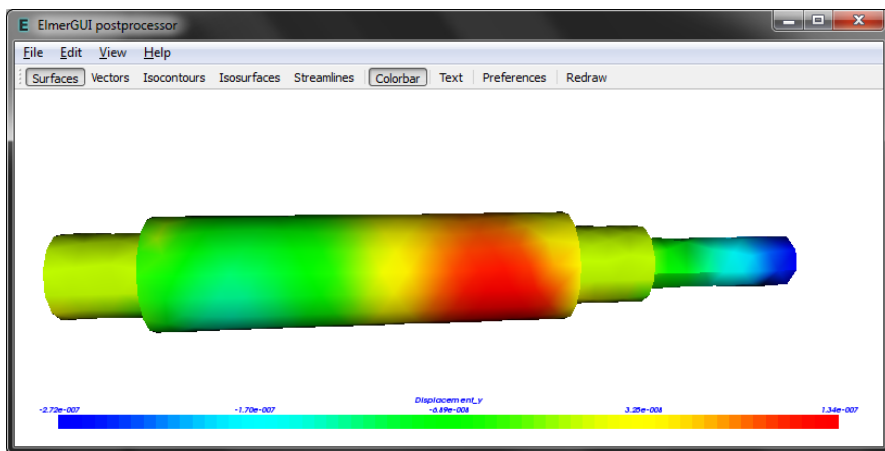


Рис. 6.16. Цветная карта деформации вала

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ДЛЯ ДОМАШНЕЙ ПОДГОТОВКИ

1. Для чего необходимо производить расчёт вала на изгиб?
2. Как влияет изгиб вала на характеристики машины и почему?
3. Как подбираются подшипники для ЭМ?
4. Из каких материалов (типов, марок) выполняются валы электрических машин?
5. Для чего на валах предусматриваются галтели и скругления?

Лабораторная работа № 7

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ РАСЧЁТЫ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Получение навыков использования программного обеспечения для моделирования электромагнитного поля электромеханических устройств на этапе проектирования.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЯСНЕНИЯ

Процесс проектирования – это процесс решения многовариантной задачи. Результатом решения является готовое изделие. В настоящее время в процессе проектирования нового электромеханического устройства можно выделить два этапа. Этап предварительного расчёта на основе аналитических методик, которые основаны на теории замещения магнитных цепей. При этом в самих методиках делается большое количество допущений, которые ухудшают качество результатов расчёта. Эту ситуацию можно исправить на следующем этапе – численном анализе и оптимизации. Этот этап появился сравнительно недавно, в начале XXI века, и связан с повышением производительности вычислительной техники.

В настоящее время существует большое количество программных продуктов для численного анализа электромагнитного поля. Так наибольшее распространение получили такие программные продукты, как ANSYS, Comsol, Elcut, Femm 2d. Отдельно стоит остановиться на последнем продукте.

FEMM представляет собой набор программ для решения низкочастотных электромагнитных, токовых и тепловых задач в двухмерной плоской и осесимметричной областях.

Программа используется для решения:

– линейных и нелинейных магнитостатических задач;

- гармонических линейных и нелинейных квазистатических магнитных задач;
- линейных электростатических задач;
- тепловых задач в установившемся тепловом состоянии;
- задач по исследованию протекания тока в проводнике.

Пакет FEMM решает уравнения Максвелла не во всех случаях. Система решает задачи магнетизма, которые могут трактоваться как «низкочастотные задачи», то есть задачи, в которых токами смещения можно пренебречь по сравнению с токами проводимости. Токи смещения обычно учитываются для решения задачи по распространению радиоволн и в данный пакет программ не входят.

3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Моделирование электромагнитного поля выполним на примере электромагнита с подвижным якорем. Эскиз электромагнита представлен на рис. 7.1. Работа выполняется по вариантам, представленным в таблице.

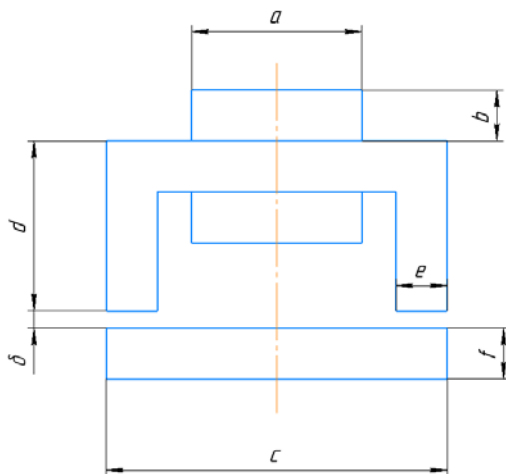


Рис. 7.1. Эскиз электромагнита

Задание по вариантам

1 подгруппа								
№	a, мм	b, мм	c, мм	d, мм	e, мм	f, мм	δ, мм	, А·В
1	50	15	100	50	15	15	5	200
2	20	30	60	50	15	20	2	150
3	50	20	90	50	20	20	5	150
4	40	10	60	25	10	10	2	100
5	30	10	70	25	10	10	1	100
6	40	5	60	30	10	5	3	80
7	10	20	25	30	5	5	2	100
8	15	20	35	35	10	10	2	150

2 подгруппа								
№	a, мм	b, мм	c, мм	d, мм	e, мм	f, мм	δ, мм	, А·В
9	55	10	75	25	8	12	3	250
10	55	8	85	25	8	8	2	210
11	65	8	85	18	8	8	1	200
12	65	8	85	20	10	8	3	250
13	40	8	65	20	10	8	3	220
14	30	12	65	25	8	10	2	300
15	40	12	60	25	6	8	2	100
16	35	8	55	15	6	6	2	150

3.1. Создание модели электромагнита

Запустим САПР систему NanoCAD, в которой создадим новый документ.

Постройте по размерам таблицы модель геометрии электромагнита. При этом стоит помнить о необходимости построения внешней воздушной оболочки вокруг электромеханического устройства. После построения должен получиться результат, представленный на рис.7.2 (размеры на эскизе не про- ставлять). Результат сохраните в формате *.dxf.

3.2. Расчёт электромагнитного поля электромагнита

Подготовка геометрии модели

Запустите программу FEMM 2D. Создайте новый документ.

Произведите импорт модели File – Import DXF. В открывшемся окне выбираем файл с моделью электромагнита. При необходимости делаем масштабирование экрана, нажатием на кнопку Zoom Extended  на инструментальной панели Zoom/Pan Toolbar (рис. 7.2).

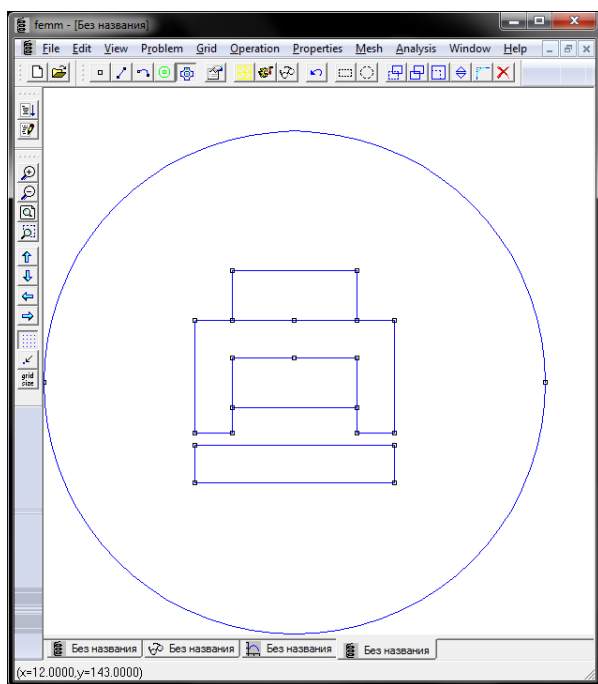


Рис. 7.2. Импортированная геометрия

Создаём метки блоков. Для этого расставим их. Воспользуемся командой указания меток блоков Block  (или пункт меню Operation – Block). Расставим метки блоков для всех областей модели.

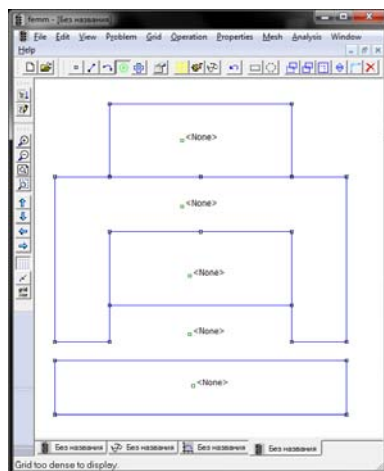


Рис. 7.3. Расстановка меток блоков

Задание материалов и граничных условий

Откроем библиотеку материалов пункт меню Properties – Materials Library.

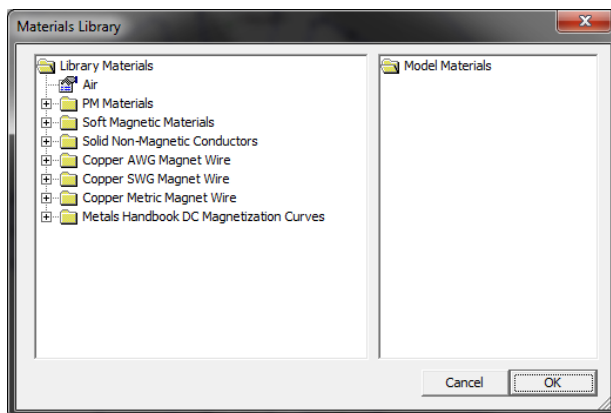


Рис. 7.4. Окно библиотеки материалов

В открывшемся окне из левой части в правую необходимо перетащить используемые в модели материалы: воздух (Air), медь (Copper) и сталь (1020 Steel). В случае необходимости создания пользовательского материала выбрать пункт меню Properties – Materials, где требуется задать свойства материала.

Создадим новое граничное условие нулевого магнитного потенциала на внешней границе модели.

Для этого откроем окно Property Definition (рис. 7.5) выбрав пункт меню Properties Boundary. В открывшемся окне создадим новое свойство, нажав на кнопку Add Property.

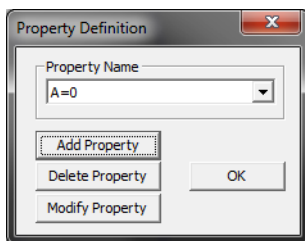


Рис. 7.5. Окно Property Definition

В окне Boundary Property (рис. 7.6) выбираем тип граничного условия Prescribed A и во всех полях значений этого свойства указываем нулевые значения.

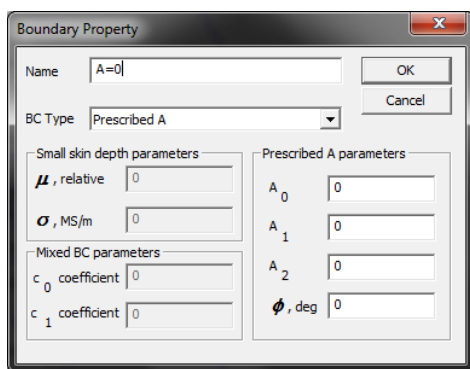


Рис. 7.6. Окно Boundary Property

Зададим новые свойства электромагнитных нагрузок для областей модели. Для этого выберем пункт меню Properties – Circuits. Создаём новое свойство. В настройках свойства (рис. 7.7) указываем его название, величину тока в проводнике обмотки.

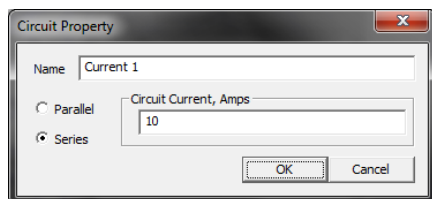


Рис. 7.7. Окно задания электромагнитной токовой нагрузки

Присваиваем подготовленные свойства к каждой области модели, заданной метками. Для этого нажимаем ПКМ на метке – она выделяется. После чего на инструментальной панели выбираем кнопку Properties . В открывшемся окне (рис. 7.8) выбираем тип материала (поле Block type), наличие электромагнитных нагрузок (поле In Circuit), количество витков в катушке (поле Number of Turns).

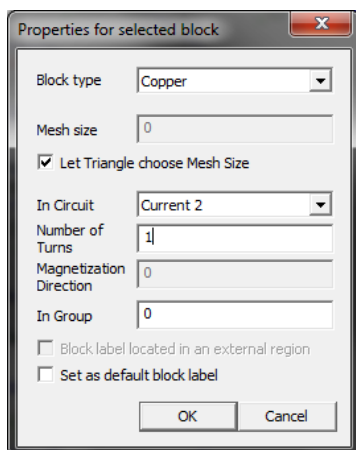


Рис. 7.8. Окно назначения свойств меткам областей

Для присвоения свойства граничного условия областям модели, необходимо перейти в режим работы с линиями – кнопка инструментальной панели Arc Segment  (или пункт меню Operation – Arc Segment). После чего выделить дуги окружности внешней границы воздуха модели и нажав на кнопку свойств, задать свойство граничного условия (рис. 7.9.).

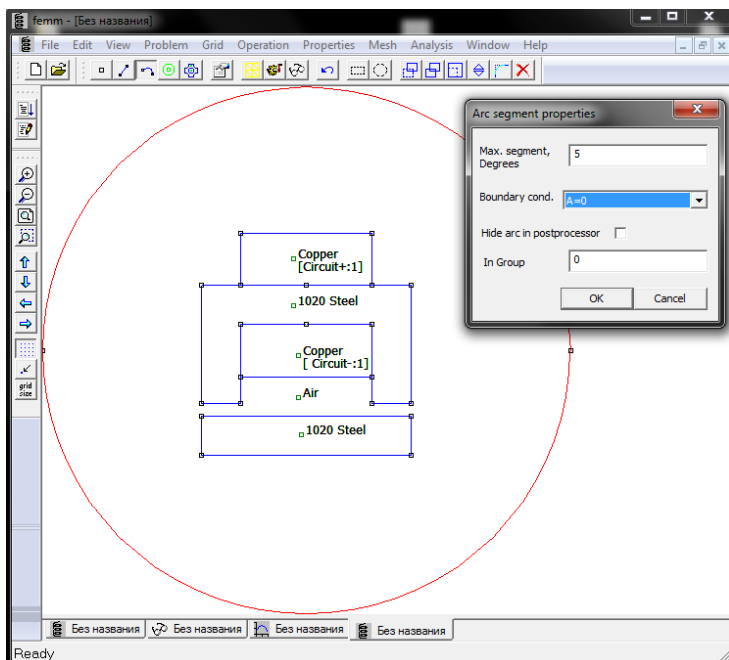


Рис. 7.9. Назначение граничных условий внешней границе модели

Расчёт модели

Перед созданием сетки конечных элементов, проект необходимо сохранить.

Создание сетки конечных элементов производится выбором операции Create Mesh в пункте меню Mesh. Результат разбития модели на сетку конечных элементов представлен на рис. 7.10.

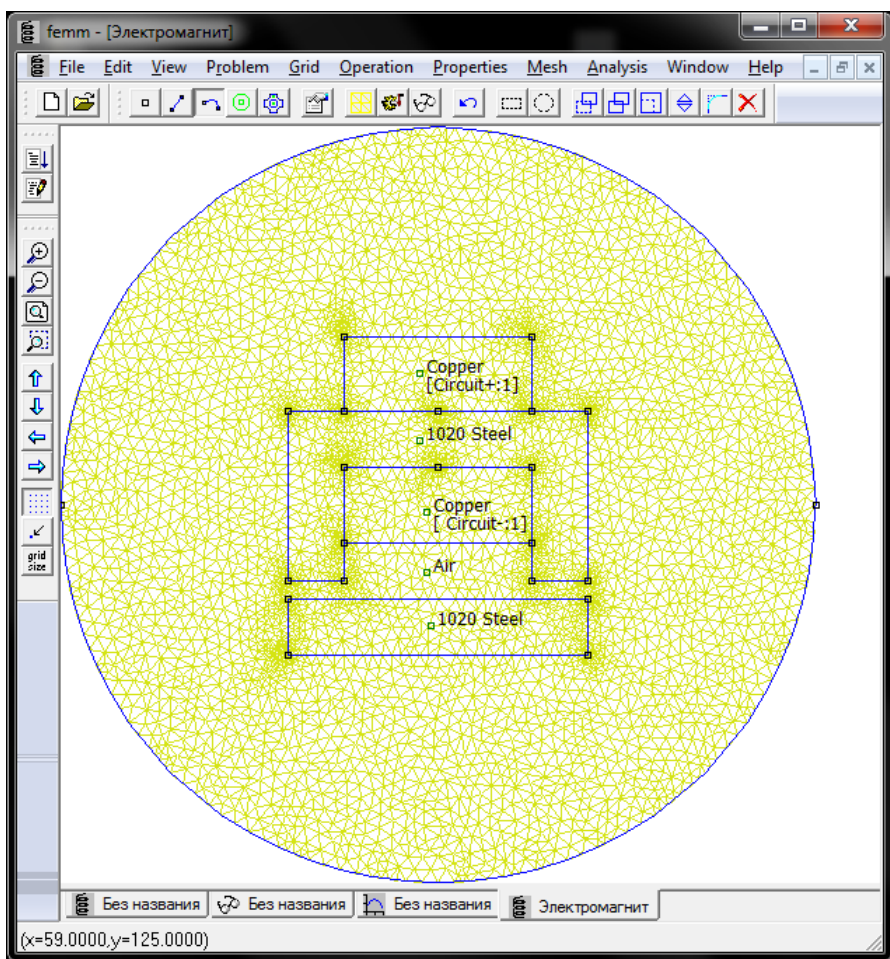


Рис. 7.10. Разбивка модели на сетку КЭ

Запускаем модель на расчёт: Analysis – Analyze.

Отображаем результаты: Analysis – View Results. По умолчанию отображаются магнитные силовые линии (рис. 7.11). Настройка величин, отображаемых визуально, производится с помощью кнопок операций, сосредоточенных в пункте меню View: Density View (картины распределения величин), Contour Plot (контурное отображение величин), Vector

Plot (отображение векторов). На рис. 7.12 представлена картина распределения магнитной индукции в модели.

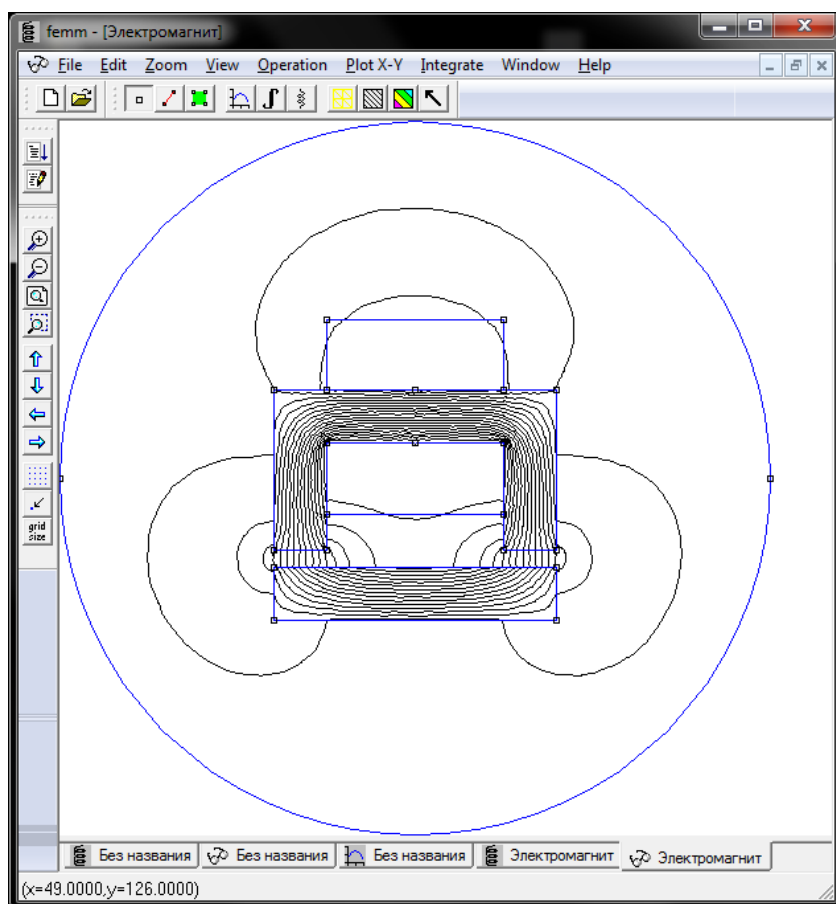


Рис. 7.11. Картина магнитных силовых линий электромагнита

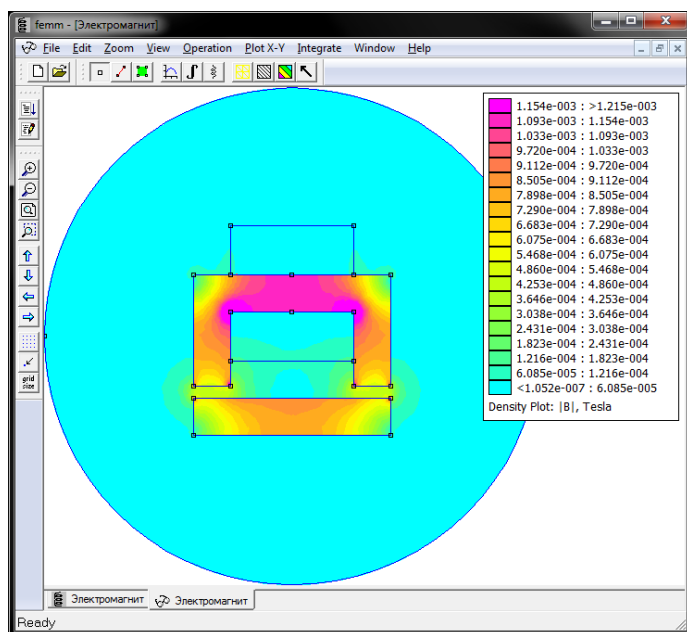


Рис. 7.12. Картина распределения магнитной индукции

Для определения силы, действующей на ярмо электромагнита, необходимо выделить его командой меню Operation – Areas. И с помощью команды Integrate проинтегрировать выделенную площадь для определения значения Force via Weighted Stress Tensor. В открывшемся окне будут отображены проекции сил на оси x, y (рис. 7.13).

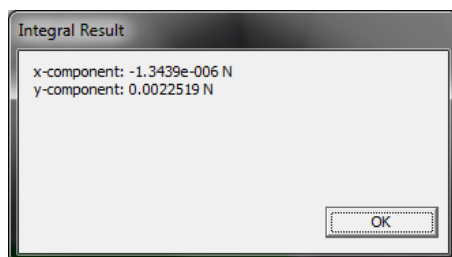


Рис. 7.13. Проекции сил, действующих на ярмо электромагнита

В о т ё т е д о л ж н ы б ы т ь п р е д с т а в л е н ы с л е д у ю щ и е м а т е р и а л ы:

- 1) внешний вид электромагнита с нанесёнными размерами из САПР системы NanoCad,
- 2) картина магнитных силовых линий электромагнита,
- 3) картина распределения магнитной индукции,
- 4) величина силы, действующей на ярмо электромагнита.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ДЛЯ ДОМАШНЕЙ ПОДГОТОВКИ

1. Для чего производятся электромагнитные расчёты ЭМУ?
2. Напишите и объясните физический смысл уравнений Максвелла.
3. Дайте рекомендации по оптимизации геометрии полученной модели электромагнита.
4. Какие оптимизационные методы можно применить для оптимизации геометрии модели?

Лабораторная работа № 8

ТЕПЛОВЫЕ РАСЧЁТЫ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Получение навыков использования программного обеспечения для моделирования теплового поля электромеханических устройств на этапе их проектирования.

2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

2.1. Определение тепловых потерь из электромагнитного расчёта

Рассчитаем распределение тепла в электромагните, посчитанном в лабораторной работе №7.

Откроем ранее рассчитанную задачу из л/р №7. Определим потери в обмотках. Для этого необходимо выделить командой меню Operation – Areas область обмотки и с помощью команды Integrate проинтегрировать выделенную площадь для определения значения Total Loss Density (объёмная плотность потерь Вт/м³) или Resistivity Loss (потери в активном сопротивлении в Вт).

2.2. Тепловой расчёт

Запустим программный продукт FEMM.

Создадим новый проект Heat Flow Problem.

Импортируем геометрию электромагнита, использованную для л/р №7.

Зададим набор материалов.

Откроем библиотеку материалов пункт меню Properties – Materials Library.

В открывшемся окне из левой части в правую необходимо перетащить используемые в модели материалы: воздух (Air), медь (Copper) и сталь (Steel).

Зададим объёмное тепловыделение от медной обмотки. Для этого зайдём настройки материала, пункт меню Properties – Materials. В списке выбираем медь (Copper) и нажимаем кнопку Modify Properties. В открывшемся окне вводим значение объёмных тепловых потерь (Volume Heat Generation), полученное из электромагнитного расчёта (рис. 8.1).

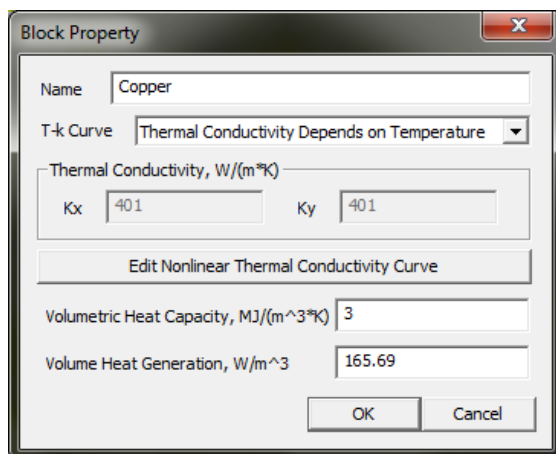


Рис. 8.1. Окно настроек свойств материала

Создадим новое граничное условие конвекции на внешней границе модели.

Для этого откроем окно Property Definition, выбрав пункт меню Properties Boundary. В открывшемся окне создадим новое свойство, нажав на кнопку Add Property.

В окне Boundary Property (рис. 8.2) выбираем тип граничного условия Convection (конвекция) и устанавливаем коэффициент теплоотдачи $h = 50 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ и температуру окружающей среды $T_0 = 300 \text{ K}$.

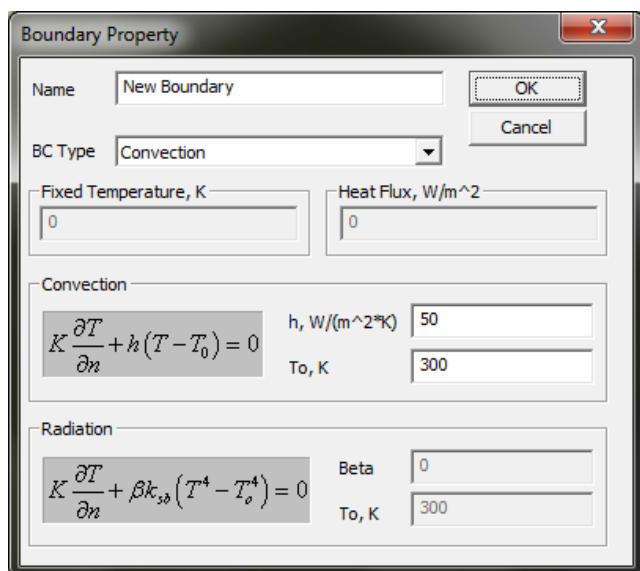


Рис. 8.2. Окно Boundary Property

Примечание

Тепловые нагрузки можно задавать и через тепловые потери, выраженные в Вт. Для этого необходимо создать новое свойство пункт меню Properties – Conductors. В настройках свойства (рис. 8.3) указываем его название, величину потерь в Вт. Следует отметить, что такой тип свойств присваивается линиям модели.

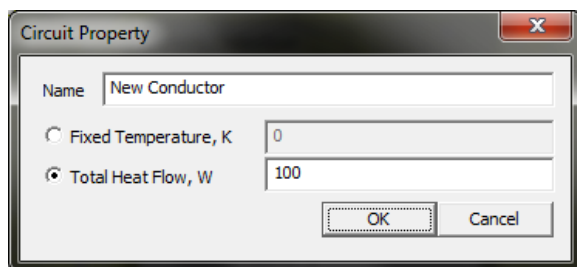


Рис. 8.3. Окно задания тепловых потерь

Присваиваем подготовленные свойства к каждой области модели, заданной метками. Для этого нажимаем ПКМ на метке – она выделяется. После чего на инструментальной панели выбираем кнопку Properties . В открывшемся окне выбираем тип материала (поле Block type).

Граничное условие конвекции присваивается внешней границе модели.

Перед созданием сетки конечных элементов проект необходимо сохранить.

Создание сетки конечных элементов производится выбором операции Create Mesh в пункте меню Mesh.

Запускаем модель на расчёт: Analysis – Analyze.

Отображаем результаты: Analysis – View Results. По умолчанию отображается картина распределения тепла (рис. 8.4).

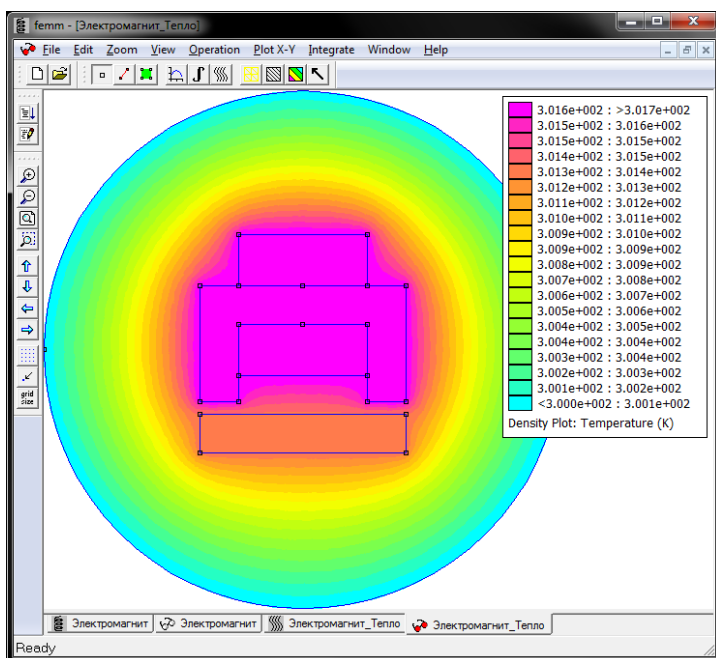


Рис. 8.4. Картина распределения тепла

В отчёте должны быть представлены следующие материалы:

- 1) внешний вид электромагнита с нанесёнными размерами из САПР системы NanoCad,
- 2) картина распределения тепла.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ДЛЯ ДОМАШНЕЙ ПОДГОТОВКИ

1. Для чего производятся тепловые расчёты при проектировании электрических машин?
2. Дайте рекомендации по улучшению теплоотвода полученной модели электромагнита.
3. Какие ошибки сделаны в методике расчёта теплового поля электромагнита и как их исправить?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кравчик А.Э. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин, Е.А. Соболенская. – М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с.
2. Проектирование электрических машин: учебник для вузов / под ред. И. П. Копылова. – 4-е изд., испр. и доп. – М.: Высшая школа, 2005. – 767 с.
3. Орлов П.И. Основы конструирования: справочно-методическое пособие. В 2-х кн. Кн. 1/ Под ред. П.Н. Учаева. – изд. 3-е. испр. – М.: Машиностроение, 1988. – 560 с.
4. NanoCAD умное проектирование. – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://www.nanocad.ru/>
5. Работа с программой NanoCAD. – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://www.bibliofond.ru/view.aspx?id=701297>
6. Вольдек А.И. Электрические машины. Учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.
7. Информационные технологии в электроэнергетике: учеб. пособие / Т.А. Бурковская. – Воронеж : Кварта, 2003. – 100 с.
8. Документация к программе Elmer. – Электрон. дан. – Режим доступа: <https://www.csc.fi/web/elmer/documentation>
9. Документация к программе Femm. – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://www.femm.info>
10. Белозоров С.А. Лабораторный практикум по курсу «Компьютерные технологии в проектировании электротехнических комплексов»: учеб. пособие [Электронный ресурс]. / С.А. Белозоров, А.В. Тикунов, Т.Е. Черных. - Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2017.

Учебное издание

Белозоров Сергей Александрович,
Тикунов Алексей Владимирович,
Черных Татьяна Евгеньевна

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ
И КОНСТРУИРОВАНИИ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН:
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

В авторской редакции

Компьютерная верстка И.С. Королева

Подписано к изданию 20.11.2017.
Объем данных 3,3 Мб.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический
университет»
394026, Воронеж, Московский просп., 14